



**Francisco de Almeida
Mata**

**Viabilidade de utilização de energias renováveis
em unidades de produção de energia elétrica de
pequena dimensão**



**Francisco de Almeida
Mata**

**Viabilidade de utilização de energias renováveis
em unidades de produção de energia elétrica de
pequena dimensão**

Relatório de estágio curricular apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (arguente)

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Fernando José Neto da Silva por todo o apoio, disponibilidade e motivação, assim como todos os conselhos e conhecimento partilhado que permitiram enriquecer este projeto.

À Grupel e todos os seus funcionários, em particular ao engenheiro Miguel Andersen, por me acolherem e me darem a oportunidade de participar neste projeto.

Aos meus amigos por toda a ajuda e apoio que me deram, não só neste projeto, mas em todo o meu percurso académico.

À minha família e namorada, por todo o apoio, confiança e compreensão demonstrados e que tão importantes foram ao longo deste meu percurso.

Palavras-chave

Energias renováveis; Sistema híbrido; HOMER

Resumo

As energias renováveis vêm surgindo como solução para substituir sistemas fósseis de produção de energia, tendo vindo a ser realizados diversos trabalhos de otimização e dimensionamento de sistemas híbridos que combinam a produção de energia elétrica a partir de sistemas que integram derivados de petróleo e fontes alternativas de energia.

Neste trabalho é estudada a viabilidade técnica, económica e ambiental da utilização de energias renováveis (fotovoltaica e eólica) como complemento de motores de combustão interna em unidades de produção de energia de pequena dimensão com qualidade deficiente de fornecimento de energia elétrica a partir da rede. Utilizando o HOMER Legacy, foi efetuado o dimensionamento e otimização de um sistema para três diferentes localizações do globo, sendo elas Santa Cruz de La Sierra (Bolívia), Luanda (Angola) e Pyay (Myanmar).

Os sistemas otimizados têm como função suportar a carga associada a uma torre de telecomunicações.

A configuração da arquitetura otimizada para cada uma das localizações estudadas poderia variar com as condições locais e com o custo de combustível local: enquanto em Santa Cruz de La Sierra, o sistema ideal era composto por painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, gerador a Diesel e rede elétrica com reduções de cerca de 25% no custo atual líquido e de 47% na quantidade de CO₂ libertado face a um sistema que utiliza apenas energias fósseis, já em Luanda um sistema composto por um gerador a diesel e pela rede elétrica representava uma melhor solução.

Estes resultados corroboram a utilidade das energias renováveis como alternativas aos sistemas usualmente utilizados. Em adição às conhecidas vantagens ambientais, as energias renováveis podem também, caso estejam reunidas as condições necessárias, ser uma mais valia a nível financeiro para o sistema a longo termo.

Keywords

Renewable energies; Hybrid system, HOMER

Abstract

Renewable energies have been emerging as a solution to replace fossil energy production systems. Several optimization and sizing works have been carried out on hybrid systems that combine the production of electric energy using petroleum based products and alternative sources of energy.

In this project a technical, economic and environmental feasibility study was carried out on using renewable energies (wind and solar) as support to internal combustion engines used in small energy production units with poor quality electricity available from the grid. Using HOMER Legacy, a system was designed and optimized for three different locations in the globe: Santa Cruz de La Sierra (Bolivia), Luanda (Angola) and Pyay (Myanmar).

Optimized systems have the purpose of supporting a load associated with telecom towers.

The optimized configuration of the system can vary from one case study to another due to local conditions or fuel cost: while in Santa Cruz de La Sierra the most suitable solution was made of photovoltaic panels, wind generators, diesel generator and grid. This solution represents reductions of about 25% in the total annualized cost, as well as 47% in the amount of CO₂ released when compared to a system made of fossil energies. On the other hand, in Luanda, the most suitable solution was constituted by a diesel generator and the electricity grid.

These results corroborate the usefulness of renewable energies as alternatives to regularly used systems. In addition to the well-known environmental advantages, renewable energies can, under certain conditions, also present a financial gain for the system in the long term.

Conteúdo

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
I Enquadramento e objetivos	1
1 Introdução e objetivos	3
1.1 Grupel	3
1.2 Sistemas autónomos	3
1.3 Sistemas híbridos	4
1.4 Objetivos do trabalho	4
1.5 Organização do trabalho	4
2 Revisão do Estado da Arte	7
2.1 Energias Renováveis	7
2.2 Torres de telecomunicações	10
3 Metodologia do trabalho	13
3.1 HOMER	13
3.1.1 Inputs	14
3.1.2 Outputs	16
3.1.3 Tipos de análise	17
4 Projeto	19
4.1 Definição de detalhe do trabalho	19
4.1.1 Sistema	19
4.1.2 Locais de estudo	21
4.1.3 Condições climatéricas locais	23
II Modelação do sistema	25
5 Modelação do sistema	27
5.1 Caso de estudo 1 (Bolívia)	27
5.1.1 Carga do sistema	28
5.1.2 Rede elétrica instável	29
5.1.3 Recurso Solar	30

5.1.4	Recurso Eólico	31
5.1.5	Modelação de componentes	31
5.1.6	Preço de diesel	37
5.1.7	Tarifário elétrico	38
5.1.8	Estratégia de controlo de sistema, restrições e emissões	38
5.1.9	Pressupostos	40
5.2	Caso de estudo 2 (Angola)	40
5.2.1	Recurso Solar	40
5.2.2	Recurso Eólico	41
5.2.3	Preço de diesel e tarifa elétrica	41
5.3	Caso de estudo 3 (Myanmar)	41
5.3.1	Recurso Solar	41
5.3.2	Recurso Eólico	42
5.3.3	Preço de diesel e tarifa elétrica	42
5.4	Dimensões a simular	43
III	Resultados e Discussão	45
6	Resultados	47
6.1	Santa Cruz de La Sierra	47
6.1.1	Custo de aquisição do sistema	48
6.1.2	Menor custo atual líquido (NPC)	48
6.1.3	Sistema com maior percentagem de energias renováveis	48
6.1.4	Comparação de emissões libertadas	49
6.1.5	Análise de resultados	49
6.2	Luanda	50
6.2.1	Custo de aquisição do sistema	50
6.2.2	Menor custo atual líquido (NPC)	50
6.2.3	Sistema com maior percentagem de energias renováveis	50
6.2.4	Comparação de emissões libertadas	51
6.2.5	Análise de resultados	51
6.3	Myanmar	52
6.3.1	Custo de aquisição do sistema	52
6.3.2	Menor custo atual líquido (NPC)	52
6.3.3	Sistema com maior percentagem de energias renováveis	52
6.3.4	Comparação de emissões libertadas	53
6.3.5	Análise de resultados	53
6.4	Estudo de sensibilidade aos parâmetros económicos	54
7	Conclusões	55
	Bibliografia	58
A	Anexo	I
A.1	Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 1 . . .	I
A.2	Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 2 . . .	I
A.3	Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 3 . . .	II

Lista de Figuras

2.1	Evolução dos gastos energéticos no planeta [2].	7
2.2	Percentagens de energia primária [2].	8
2.3	Produção de eletricidade estimada através de energias renováveis [3].	8
3.1	Modo de funcionamento do programa HOMER.	14
3.2	Carga aplicada no software HOMER, para exemplificação.	14
3.3	Painel de recurso solar no HOMER.	15
3.4	Resultados ilustrativos, obtidos a partir do software HOMER.	16
4.1	Localização dos locais de estudo	22
5.1	Sistema modelado no HOMER	27
5.2	Perfil de carga horário	28
5.3	Mapa de dados	29
5.4	Horário de funcionamento da rede	30
5.5	Perfil da radiação solar para Santa Cruz de La Sierra, Bolívia	30
5.6	Médias mensais da velocidade do vento para Santa Cruz de La Sierra, Bolívia	31
5.7	Modelação dos painéis fotovoltaicos	32
5.8	Modelação da Turbina eólica	33
5.9	Curva de potência de Bornay 6000	33
5.10	Inputs relacionados com o funcionamento do gerador	34
5.11	Modelação das baterias SDR 12V-225Ah	35
5.12	Dimensionamento do banco de baterias	36
5.13	Modelação o inversor	37
5.14	Estratégia de controlo do sistema	38
5.15	Restrições aplicadas ao sistema	39
5.16	Perfil da radiação solar para Luanda, Angola	40
5.17	Médias mensais da velocidade do vento para Luanda, Angola	41
5.18	Perfil da radiação solar para Pyay, Myanmar	42
5.19	Médias mensais da velocidade do vento para Pyay, Myanmar	42

Lista de Tabelas

4.1	Painel Solar	20
4.2	Turbina eólica	20
4.3	Gerador a Diesel	20
4.4	Baterias	21
4.5	Inversor	21
5.1	Dimensões possíveis do sistema	43
6.1	Resultados caso de estudo 1	48
6.2	Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 1	49
6.3	Resultados caso de estudo 2	50
6.4	Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 2	51
6.5	Resultados caso de estudo 3	52
6.6	Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 3	53
A.1	Resultados do estudo de sensibilidade para Santa Cruz de La Sierra	I
A.2	Resultados do estudo de sensibilidade para Luanda	I
A.3	Resultados do estudo de sensibilidade para Pyay	II

Parte I

Enquadramento e objetivos

Capítulo 1

Introdução e objetivos

Este trabalho surge no âmbito de uma parceria entre a empresa Grupel e a Universidade de Aveiro que tem como finalidade o desenvolvimento de um gerador híbrido de energia que utilize energias renováveis, juntamente com os geradores produzidos pela empresa. Este trabalho acaba por se inserir no projeto global numa fase inicial, procurando estudar a viabilidade técnica, económica e ambiental de diversos sistemas, com o intuito de selecionar o sistema que melhor se adequa às particularidades de cada local selecionado.

1.1 Grupel

A Grupel, fundada em 1976, iniciou a sua atividade como uma pequena unidade produtiva em Alquerubim que fabricava e comercializava geradores. Em 1980 a empresa adquire as suas primeiras instalações fabris, tendo nestas permanecido até 2013, altura em que inaugurou as novas instalações na zona industrial de Vagos. Em 2009 a empresa, em parceria com o BES, recebeu o selo de PME Líder, atribuído pelo IAPMEI, a empresas que se destaquem pelas suas notações de rating ou indicadores económicos.

Em 2010 a marca Grupel adquiriu uma empresa espanhola, Cymasa- Grupos electrógenos SL, líder em geradores de grandes potências. As duas marcas acabariam por se fundir em 2015, dando origem à marca atual, Grupel Engineering by Cymasa. Esta fusão teve como objetivo juntar as soluções standard de grande competitividade Grupel, ao Know-How e força de engenharia Cymasa.

Hoje em dia a marca Grupel tem uma vasta gama de soluções de geradores, com potência a variar desde os 6 até aos 3500 kVA. A empresa é também líder nacional, produzindo cerca de 80 % dos geradores a Diesel produzidos em Portugal, e está presente em mais de 40 países, distribuídos pelos 5 continentes. No final do ano de 2015, a empresa teve uma faturação de, aproximadamente, 13,79 M€ [1].

1.2 Sistemas autónomos

Um sistema autónomo de produção de energia é um sistema que não se encontra conectado à rede de eletricidade. Estes sistemas são, geralmente, utilizados como formas

de geração de energia em zonas remotas, onde não existe rede elétrica, ou em locais onde a rede apresenta problemas como instabilidade ou fraca capacidade.

Nestes locais os geradores de energia têm um importante papel por serem o único meio de geração de energia. No entanto, estes geradores apresentam elevados gastos de combustível, o que leva à libertação de elevadas quantidades de gases com efeito de estufa e elevados gastos operacionais. As energias renováveis podem constituir uma forma interessante de reduzir as quantidades de emissões libertadas e os custos associados ao consumo de combustível, mas mantendo a produção de energia estável. A estes sistemas dá-se o nome de sistemas híbridos.

1.3 Sistemas híbridos

Um sistema híbrido de geração de energia consiste num sistema que utiliza mais do que uma fonte de energia. As fontes de energia mais usualmente utilizadas passam por sistemas que utilizam máquinas térmicas juntamente com energias renováveis. Este sistema pode apresentar as mais diversas configurações, podendo, por exemplo, variar o tipo de energias renováveis utilizadas, ou o tipo de máquina térmica.

O sistema híbrido em comparação com o tradicional tem vantagens como a redução de utilização de combustível, o que leva a menores emissões de gases causadores de efeito de estufa ou a redução dos custos de operação e manutenção, entre outras.

Desta forma, os sistemas híbridos são vistos como uma área interessante tanto do ponto de vista ambiental, como do ponto de vista técnico, por apresentarem as vantagens ambientais das energias renováveis em conjunto com as capacidades técnicas das máquinas térmicas.

1.4 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo de viabilidade técnica, económica e ambiental de um sistema híbrido de produção de energia de pequenas dimensões a ser utilizado como suporte ao fornecimento de energia a torres de telecomunicação posicionadas em locais remotos do globo.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho vai estar dividido em três partes. Na parte inicial, será efetuada uma revisão bibliográfica, com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre o tema do trabalho, bem como sobre o software que irá ser utilizado durante a realização do mesmo. Esta parte terá também uma secção reservada à definição de detalhe do projeto, onde serão definidas todas as variáveis e características que poderão influenciar os resultados finais.

Na segunda parte do trabalho proceder-se-á à modelação do sistema no software HOMER, com determinação de todos os parâmetros necessários para uma correta utilização

deste.

A terceira e última parte terá como foco os resultados e conclusões possíveis de retirar, tendo em conta os pontos de vista financeiro, técnico e ambiental.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

2.1 Energias Renováveis

O constante crescimento populacional no planeta tem levado a um aumento das necessidades energéticas. A BP realizou uma previsão energética até ao ano de 2035 [2], onde se pode observar, Fig.2.1, que os gastos energéticos deverão aumentar durante esse período. Assim, o mundo debate-se com um dilema que se prende com a necessidade de aumentar a produção energética, tendo em conta a necessidade de diminuir a libertação de gases causadores do efeito de estufa.

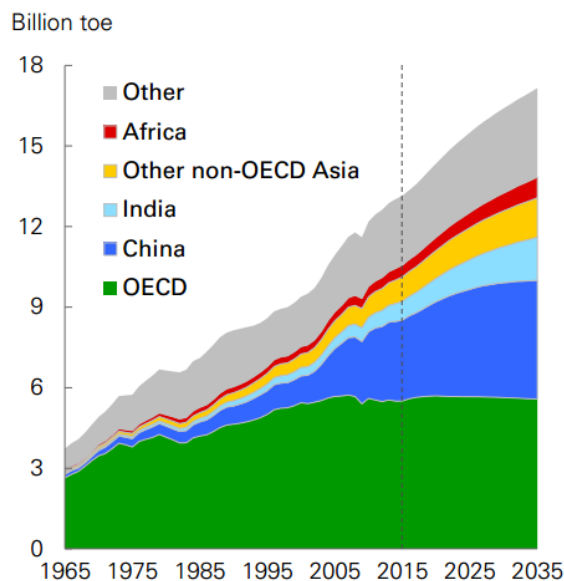


Figura 2.1: Evolução dos gastos energéticos no planeta [2].

A utilização de energias renováveis, toma, desta forma, uma importância muito elevada, por ser uma das formas de produção energética mais “amigas” do ambiente. O relatório da BP [2] prevê (Fig. 2.2), que, até 2035, haja um decréscimo substancial na produção de energia a partir de recursos fósseis, como o carvão ou o petróleo, havendo um aumento substancial do papel das energias renováveis (solar, eólica, geotérmica, bio-

massa e biocombustíveis).

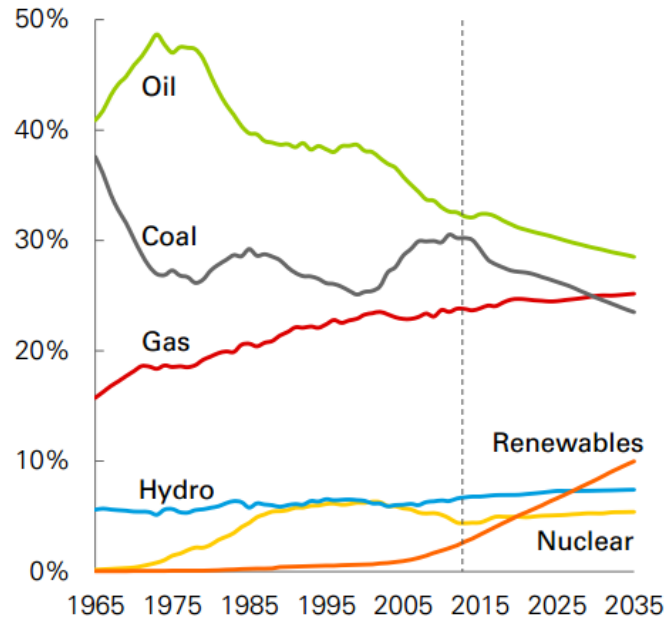


Figura 2.2: Percentagens de energia primária [2].

Hoje em dia, as energias renováveis representam já uma boa fatia da produção mundial de energia elétrica (23,7%), sendo o resto desta energia produzida através de recursos não renováveis (76,3%) [3], Fig. 2.3. No entanto, esta produção de eletricidade através de energias renováveis ainda está longe do valor necessário para se alcançar a meta da redução da emissão de compostos de carbono até 2050 em 80%, quando comparado com o ano de 1990 [4]. Assim, muitos estudos têm vindo a ser efetuados com o intuito de estudar a aplicação de energias renováveis em diversas áreas.

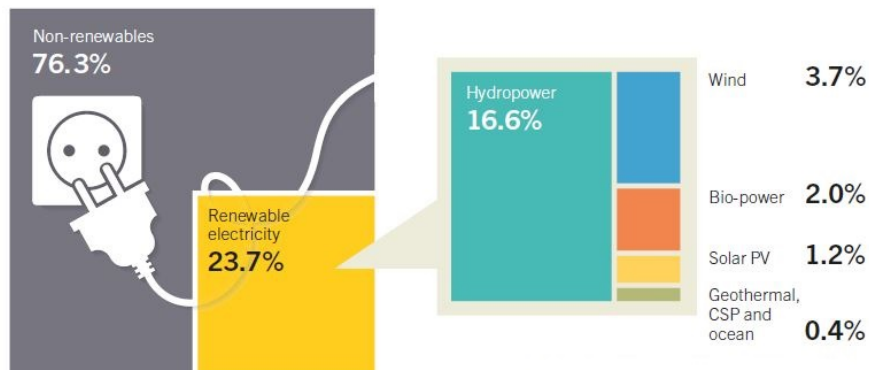


Figura 2.3: Produção de eletricidade estimada através de energias renováveis [3].

Uma dessas áreas é a da produção de eletricidade em regiões ou aplicações onde não existe a possibilidade de se fazer uma ligação à rede de energia ou onde a energia da rede não tem a melhor qualidade, devido a perdas e perturbações durante o transporte. Essas aplicações podem ser, por exemplo, em aldeias remotas, torres de telecomunicação, ou ilhas, por se tratarem de locais onde há necessidade de existência de energia, mas não há forma de esta ser produzida a não ser por módulos autónomos.

Khan e Iqbal [5] avaliaram a utilização de um sistema híbrido que poderia conter painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, gerador a Diesel ou banco de baterias para a zona de St John's, NL, Canada. Utilizando o software HOMER, os autores concluíram que a solução ideal para aquele local, dada a boa disponibilidade de recursos eólicos, consistia num sistema híbrido composto por turbinas eólicas, gerador a diesel e baterias.

Hossain et al. [6], através do programa HOMER, realizaram um estudo de viabilidade para uma unidade hoteleira na ilha de Tioman, na Malásia. O sistema que apresentava a solução otimizada para este local consistia num sistema híbrido composto por turbina eólica, painéis fotovoltaicos, gerador a diesel e baterias.

Bortolini et al. [7] realizaram um estudo analítico, de forma a averiguar a viabilidade da utilização de modelos híbridos de produção de energia para uma vila remota na Rússia. Comparando as diferentes conjugações possíveis do sistema híbrido com a solução de um gerador a Diesel isolado, foi possível observar que o sistema híbrido otimizado apresentava vantagens económicas e ambientais em relação ao sistema simples.

Hafez e Bhattacharya [8] realizaram um estudo sobre quatro distintas formas de se fazer a alimentação energética de uma vila. As hipóteses consistiam num gerador a Diesel isolado, energias renováveis apenas, um sistema híbrido com energias renováveis e um gerador a Diesel, e, por fim, um sistema em que a vila se encontra ligada à rede. Foi utilizado o software HOMER e, comparando os resultados obtidos para cada um dos sistemas, concluiu-se que a situação mais rentável financeiramente consistia na ligação à rede. No entanto, concluíram também que esta solução apenas era viável para zonas que necessitavam de uma extensão de rede de poucos quilómetros. Para zonas mais remotas, onde uma grande distância de extensão de rede é necessária, concluiu-se que a solução mais rentável era a do sistema híbrido.

Maatallah et al. [9] investigaram qual a forma mais rentável, económica e ambientalmente, de produzir energia para a zona de Bizerte, na Tunísia. Neste estudo, utilizando o programa HOMER, ficou comprovado que a utilização de energias renováveis reduz o custo total de operação do sistema a longo prazo. Os resultados mostraram também a utilidade de se utilizarem baterias, como forma de armazenar o excesso de energia produzido. O local tem gastos energéticos de cerca de 13 kWh/d, e o sistema obtido pela otimização, por ser uma zona com bons recursos eólicos, consistia num sistema composto por turbinas eólicas, gerador a diesel e baterias.

Shezan et al. [10] realizaram uma análise técnico-económica sobre qual a melhor forma de produção de energia para uma vila na Malásia, com um gasto de cerca de 33 kWh/d. A melhor solução encontrada foi um sistema composto por painéis fotovoltaicos

cos, turbinas eólicas, gerador a diesel e baterias, que representava uma redução tanto no custo de energia, como no custo total do sistema. Esta solução, representava também uma redução de cerca de 25% nas emissões de gases com efeito de estufa.

Thiam [11] concluiu que a utilização de painéis fotovoltaicos como forma de produção de energia em três regiões remotas do Senegal era a solução ideal, quando comparado com a utilização de geradores a Diesel ou de turbinas eólicas.

Estes estudos vêm corroborar a ideia de que as energias renováveis, nomeadamente a energia solar e eólica, são opções viáveis para serem utilizadas como formas de produção de energia.

2.2 Torres de telecomunicações

As torres de telecomunicações muitas vezes encontram-se em locais remotos e de difícil acesso, onde a única forma de produção de energia passa por sistemas autónomos, ou seja, sistemas que produzem energia localmente, sem recurso à energia da rede. Dentro deste grupo de sistemas, a forma mais usualmente utilizada são geradores a Diesel, que trabalhando ininterruptamente, fornecem energia ao sistema. No entanto, para estes geradores trabalharem é necessário combustível, o que leva a elevados custos de operação e manutenção. Por outro lado, o combustível utilizado acarreta também problemas de cariz ambiental, devido à elevada quantidade de emissões libertadas.

Deste modo, este sector procura novas soluções, com a mesma qualidade técnica, mas com melhorias significativas no que toca aos aspetos financeiros e ambientais. As energias renováveis surgem assim como principal foco de atenção da comunidade energética. Apesar dos elevados custos de aquisição, estas destacam-se devido, não só aos reduzidos custos de operação e manutenção, mas principalmente às vantagens que apresentam no campo ambiental. Também nesta área, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de dimensionar e otimizar sistemas híbridos como forma de produção de energia a ser utilizada por torres de telecomunicação.

Amutha e Rajini [12] fizeram uma avaliação técnico-económica sobre as diferentes composições possíveis de um sistema de produção de energia para corresponder a uma carga encontrada, normalmente, numa torre de telecomunicações remota. Foi então concluído que a melhor solução seria aquela que utiliza um sistema constituído por painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, gerador a diesel e células de combustível.

Paudel [13] otimizou um sistema híbrido de produção de energia para uma torre de telecomunicações no Nepal. O autor comparou três diferentes configurações para o sistema: 1) painéis fotovoltaicos - baterias, 2) turbinas eólicas - baterias e 3) painéis fotovoltaicos - turbinas eólicas - baterias. Após simulações utilizando o programa HOMER, o autor chegou à conclusão que para o local indicado a configuração ideal seria a do sistema híbrido. Neste estudo, foi também efetuado uma análise de sensibilidade, onde se alteraram os valores médios da radiação solar disponível e da velocidade do vento,

chegando-se à conclusão que para certos valores a configuração ideal poder-se-ia alterar.

Olatomiwa et al. [14] utilizaram o programa HOMER para comparar dois sistemas que tinham como base as energias renováveis, sendo eles: 1) painéis fotovoltaicos - gerador a diesel - baterias e 2) painéis fotovoltaicos - turbinas eólicas - gerador a diesel - baterias, com um sistema em que o gerador a Diesel funcionava a solo. Através dos resultados de otimização obtidos foi possível observar que para uma torre de telecomunicações na Nigéria, a solução ideal, devido ao excelente recurso solar e fraco recurso eólico, foi a solução constituída por painéis fotovoltaicos, gerador a diesel e baterias (Redução de cerca de 70% em custos).

A utilização de energias renováveis em sistemas híbridos de produção de energia necessita, no entanto, que se faça uma cuidadosa otimização, de forma a se garantir que a relação custo-benefício é vantajosa. Para tal, diversos softwares foram desenvolvidos com o objetivo de realizar uma análise minuciosa sobre os fatores técnicos, económicos e ambientais dos sistemas em questão [15]. Neste trabalho, será utilizado o programa HOMER que é o software de otimização mais comumente utilizado [16].

Capítulo 3

Metodologia do trabalho

Este trabalho de estágio, tal como referido no primeiro capítulo, insere-se num projeto resultante da parceria entre a Universidade de Aveiro e a empresa Grupel, e tem como objetivo realizar um estudo de viabilidade de utilização de energias renováveis em unidades de produção de energia elétrica de pequena dimensão. Para tal, será utilizado o software HOMER, o software mais comumente utilizado neste tipo de estudos, para realizar uma simulação de diferentes conjugações de sistemas híbridos, utilizando energia solar e eólica, juntamente com geradores a Diesel, como forma de abastecimento de energia a uma torre de telecomunicações.

Este tipo de torres de telecomunicações, geralmente, encontra-se em zonas isoladas, onde a rede elétrica não existe ou então não apresenta as melhores condições. Por esta razão, a simulação a levar a cabo no software terá de imitar as condições observadas neste tipo de locais, quer por não utilizar rede no sistema ou por criar uma rede instável, ou seja, uma rede que apresente falhas. Tal como referido anteriormente, as energias renováveis a simular são a energia solar e a energia eólica. Para tal, sendo essencial para a simulação saber os detalhes técnicos e económicos dos componentes (painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas), foi necessário selecionar fornecedores e obter os dados necessários a partir dos mesmos.

3.1 HOMER

O Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), é um software desenvolvido pelo U.S National Renewable Energy Laboratory (NREL) e tem a função de assistir no planeamento e design de sistemas de energia com recurso a energias renováveis [8]. O software utiliza “inputs” (Fig. 3.1) de forma a obter determinados resultados (“outputs”) da simulação. O HOMER dispõe de quatro recursos renováveis para simulação, sendo eles solar, eólico, hídrico e biomassa. A junção destes mesmos recursos com geradores a Diesel, ou com a própria rede elétrica, permite realizar diferentes conjugações, que caso sejam viáveis para a carga atribuída, serão ordenadas consoante o custo atual líquido do sistema (NPC).

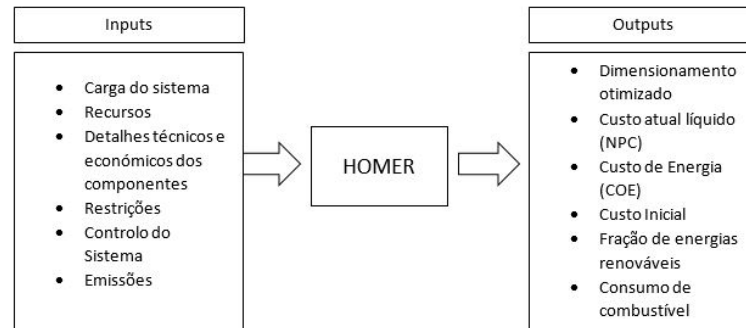


Figura 3.1: Modo de funcionamento do programa HOMER.

3.1.1 Inputs

Os “inputs” atribuídos ao programa são fundamentais para a simulação ser fiável e apresentar resultados de qualidade. Desta forma, importa diferenciar cada um desses “inputs” e explicar como os mesmos são aplicados:

Carga do sistema - Carga total que o sistema terá de suportar, tendo em conta as médias horárias, mas também o pico que possa existir. Esta carga é fornecida ao software sob a forma de perfil de carga horário, Fig. 3.2, tratando o HOMER de em seguida fazer uma variação para o perfil anual. No HOMER podem ser efetuados dois tipos de variações, horária e diária. Para tal, o utilizador apenas tem de definir a percentagem de variabilidade pretendida, sendo que o HOMER a partir desses valores irá criar flutuações no perfil diário inicial, moldando, assim, o perfil anual de carga do sistema;

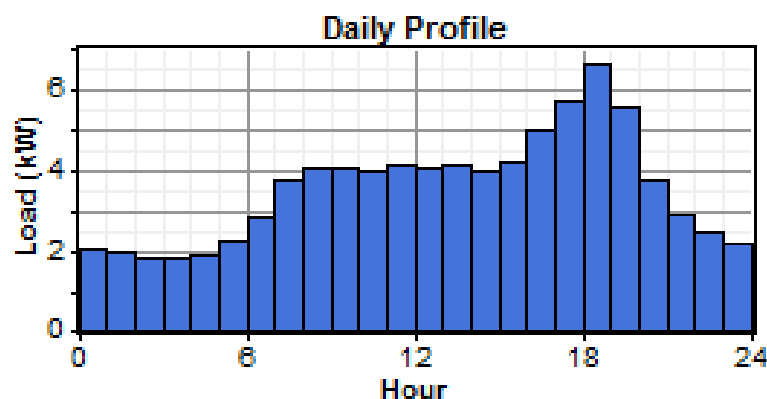


Figura 3.2: Carga aplicada no software HOMER, para exemplificação.

Recursos - Recursos renováveis existentes no local em estudo, por exemplo, recurso solar registado mensalmente naquele local durante um ano, tal como é possível observar na Fig.3.3. Importa referir que o software HOMER, apesar de não possuir uma base de dados própria, através das coordenadas da longitude e latitude, consegue obter os recursos solares a partir do site da "NASA Surface Meteorology and Solar Energy"[8];

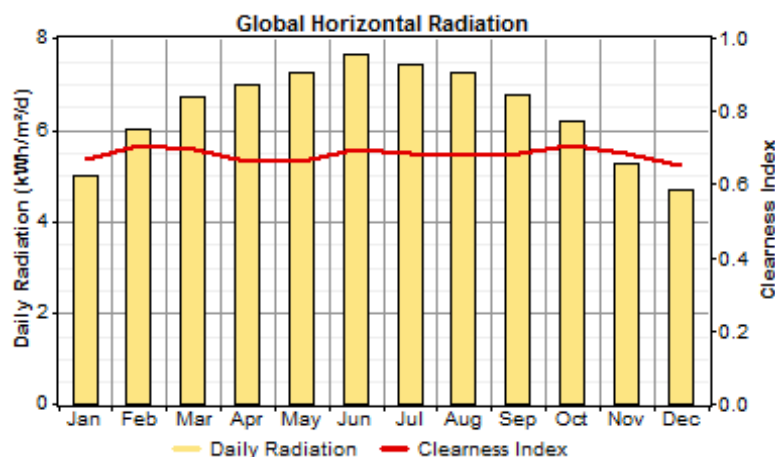


Figura 3.3: Painel de recurso solar no HOMER.

Detalhes dos componentes - Detalhes económicos e técnicos dos diferentes componentes do sistema. No caso dos painéis solares, por exemplo, é necessário indicar o preço de aquisição, preço de substituição e custo de operação e manutenção nos detalhes económicos, enquanto que nos detalhes técnicos é importante referir a potência, tempo de vida, entre outros;

Tarifas - Este input refere-se aos custos associados à obtenção quer de energia da rede elétrica, como da compra de combustível.

Restrições - As restrições são as condições a que o nosso sistema deve obedecer de forma a ser considerado viável. São exemplos destas restrições a percentagem de energias renováveis mínima e a percentagem máxima de carga que não é alcançada;

Controlo do sistema - Este input refere-se ao modo como o nosso gerador e/ou grupo de baterias se irá comportar durante a simulação. O HOMER permite dois tipos de análise, o primeiro, "load following", no qual o gerador produz apenas a energia suficiente para fazer face à carga necessária. O segundo, "cycle charging", define que o gerador sempre que for necessário irá trabalhar a máxima carga, carregando o banco de baterias até uma capacidade determinada pelo utilizador;

Emissões - Este input pode ser diferenciado em duas partes. A primeira passa por penalizações que serão aplicadas caso as emissões do nosso sistema ultrapassem certos valores máximos permitidos. A segunda, por outro lado, passa por limitar os valores máximos permitidos de emissões. Quando atingidos esses limites, o gerador fica impossibilitado de atuar.

3.1.2 Outputs

Os resultados finais, por seu lado, aparecem numa tabela ordenados pelo menor custo de energia, tal como é possível observar na Fig. 3.4. Os “outputs” possíveis de retirar são diversos e dão informações bastante importantes em estudos deste tipo:

PV (kW)	W500	Grid (kW)	Label (kW)	S4KS25P	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Grid Fuel (kg)	Grid (hrs)	Label (hrs)
6	1	10	5	5	20	0	\$ 23,500	12,500	\$ 183,290	0.427	0.19	2,941	21,297	4,902	2,051
6	1	10	5	5	20	0	\$ 29,500	12,143	\$ 184,733	0.430	0.24	2,844	19,842	4,902	2,018
6	1	10	5	5	20	0	\$ 8,500	14,485	\$ 193,662	0.451	0.00	3,788	25,396	4,902	2,462
6	1	10	5	5	20	0	\$ 14,500	14,045	\$ 194,039	0.452	0.05	3,493	24,368	4,902	2,273
6	1	10	10		20	0	\$ 18,718	15,015	\$ 210,664	0.491	0.18	7,009	15,715	4,902	3,935
6	1	10	10		20	0	\$ 24,718	14,847	\$ 214,506	0.500	0.23	6,906	14,839	4,902	3,914
6	1	10	10		20	0	\$ 3,718	16,522	\$ 214,925	0.501	0.00	7,353	19,831	4,902	4,015
6	1	10	10		20	0	\$ 9,718	16,273	\$ 217,744	0.507	0.05	7,226	18,770	4,902	3,992
8	1	10	10		20	0	\$ 28,718	16,813	\$ 243,648	0.568	0.23	12,882		6,029	
8	1	10	10		20	0	\$ 34,718	16,546	\$ 246,235	0.574	0.27	12,398		5,895	
10	1	10	10		20	0	\$ 8,718	18,993	\$ 251,516	0.586	0.00	15,176		6,752	
10	1	10	10		20	0	\$ 14,718	18,726	\$ 254,105	0.592	0.05	14,662		6,656	
50	30	200			20	0	\$ 317,000	137,920	\$ 2,080,080	4.846	0.30	137,020		4,420	
50	30	200			20	0	\$ 137,000	170,831	\$ 2,320,792	5.406	0.15	179,304		5,784	
50	30	200			20	0	\$ 192,000	199,963	\$ 2,748,196	6.402	0.13	203,732		6,572	
50	30	200			20	0	\$ 12,000	257,575	\$ 3,304,674	7.698	0.00	271,529		8,759	

Figura 3.4: Resultados ilustrativos, obtidos a partir do software HOMER.

Dimensionamento otimizado - Apresenta todas as soluções viáveis para o sistema, ordenadas pelo custo de energia. O software dá também informação da composição do sistema ideal, bem como que dimensões os mesmos possuem (Fig.3.4). Caso seja feita uma análise de sensibilidade, os resultados aparecerão organizados e agrupados por cada caso de análise;

Custo atual líquido (NPC) - O custo atual líquido de um sistema é o valor atualizado de todos os gastos sobre os quais o sistema incorre ao longo do seu tempo de vida, menos o valor atualizado de todos os lucros obtidos a partir do sistema ao longo do seu tempo de vida. Os gastos podem incluir custos de aquisição e substituição, custos de operação e manutenção, custos associados ao combustível, penalizações relacionadas com as emissões e custos de compra de energia elétrica da rede. Os lucros podem, por sua vez, estar relacionados com a venda dos componentes no final do tempo de vida do sistema, ou da energia vendida à rede.

O custo atual líquido é, assim, o parâmetro mais importante para o software no que toca aos outputs económicos do sistema, sendo este aquele que o software utiliza para determinar qual o sistema mais rentável economicamente para o caso em estudo;

Custo de Energia (COE) - O COE é definido como sendo o custo médio por kWh de energia útil produzida pelo sistema. Este valor é obtido pela divisão do custo anual

de produção de energia elétrica (soma dos custos anuais de todos os componentes do sistema), pelo total de energia elétrica útil obtida por ano;

Capital de investimento - Capital necessário no início para tornar o sistema realidade, ou seja, o custo total de aquisição de todos os componentes que fazem parte do sistema;

Fração de energias renováveis - Percentagem de energia total do sistema que foi obtida a partir de fontes renováveis. O HOMER calcula esta fração, dividindo o total de energia obtida através de energias renováveis, pelo total de energia produzido pelo sistema;

Consumo de combustível - Quantidade de combustível utilizado por cada um dos sistemas.

Estes são apenas alguns dos mais importantes resultados que é possível retirar do HOMER, outras informações como, por exemplo, a quantidade de emissões libertadas, ou a percentagem de energia produzida por cada componente, são também possíveis de obter através deste programa.

3.1.3 Tipos de análise

O HOMER permite, assim, com estes “inputs” e “outputs”, ao seu utilizador efetuar três tipos de tarefas, sendo elas: simulação, otimização e análise de sensibilidade.

Simulação

Na análise de simulação, o HOMER identifica as conjugações de sistemas que são viáveis, assim como os custos associados a cada um destes sistemas para cada hora do ano. Por outro lado, a configuração do sistema, bem como, as estratégias de operação do mesmo são também testadas nesta fase. Tanto a tarefa de otimização, como a análise de sensibilidade dependem da simulação para obter os seus resultados [8].

Otimização

Na fase de otimização, concluída que está a simulação, o HOMER, exhibe todas as soluções consideradas viáveis durante a fase de simulação, ordenando-as de acordo com o menor custo atual líquido de funcionamento do sistema (NPC). Assim, o HOMER define a configuração do sistema otimizada, como aquela que corresponde a todos os requisitos mínimos do sistema, apresentando o menor custo atual líquido [8].

Análise de sensibilidade

Nesta fase, o HOMER permite ao utilizador analisar que efeitos podem causar variações em determinados parâmetros. Alterações como o número de componentes, a abundância, ou escassez, de recursos renováveis ou a variação do preço de parâmetros como a rede elétrica ou o combustível podem ser avaliados. Para tal, o HOMER realiza a

simulação em cada uma das condições definidas anteriormente, determinando o sistema ótimo para cada uma destas variações. Assim, o principal objetivo desta ferramenta do HOMER é permitir analisar qual a solução ideal, mesmo havendo alterações dos recursos disponíveis [8].

Capítulo 4

Projeto

4.1 Definição de detalhe do trabalho

Esta secção terá como função definir o sistema e também todos os inputs associados ao software HOMER.

4.1.1 Sistema

O sistema a representar no HOMER será um sistema híbrido de produção de energia, utilizando energia solar e eólica em conjunto com um gerador a Diesel como forma de produção de energia. Importa também referir que o sistema terá armazenamento de energia, na forma de baterias, caso estas se provem rentáveis. Em análise estará também uma rede elétrica instável, ou seja, essa rede apresentará falhas nas horas críticas de energia, de forma a recriar as condições encontradas nas zonas do globo que serão analisadas.

A carga a que o sistema híbrido vai estar sujeito será suportada pelas energias renováveis em conjunto com o banco de baterias e, caso tal não seja possível, entrarão então em ação a rede elétrica e o gerador a Diesel. Desta forma, procurar-se-á reduzir os gastos em combustível, bem como os custos de aquisição de energia à rede.

Componentes do sistema

O sistema desenvolvido neste trabalho será constituído por painéis solares, turbinas eólicas, banco de baterias, gerador a Diesel e um inversor, sendo necessário saber-se diversos detalhes de cada um destes componentes para se realizar a simulação. Assim, nesta secção serão detalhados cada um dos constituintes do sistema híbrido, tanto do ponto de vista técnico como económico.

Painéis PV

Os painéis solares selecionados para o sistema em estudo são painéis da marca SolarWorld, modelo 300 Mono. A tabela 4.1 apresenta as características mais importantes deste modelo.

Tabela 4.1: Paine Solar

Modelo	300 Mono
Fabricante	SolarWorld
Potência nominal	300 W
Custo de aquisição e substituição	270 €/unid
Custos de operação e manutenção	27 €/ano

Turbinas eólicas

As turbinas eólicas selecionadas são turbinas da marca Bornay, modelo Bornay 6000. As especificações técnicas e económicas deste modelo estão detalhadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Turbina eólica

Modelo	Bornay 6000
Fabricante	Bornay
Potência nominal	6000 W
Custo de aquisição e substituição	9043 €/unid
Custos de operação e manutenção	452 €/ano

Gerador

O gerador selecionado trata-se de um gerador Perkins de 20 kVA. Este gerador foi selecionado da gama de produtos Grupel, por ser aquele que melhor satisfazia as cargas a que o sistema está sujeito. O gerador é composto por um motor Perkins 404A-22G1, um alternador Stanford PI 144E e, por último, por uma canópia 1600. As características mais detalhadas deste gerador, encontram-se referenciadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Gerador a Diesel

Modelo	Perkins 20 kVA
Fabricante	Grupel
Potência	15,7 kW
Tempo de vida	30000 h
Carga mínima	30 %
Combustível	Diesel
Custo aquisição e substituição	5737 €
Custos de operação e manutenção	0,070 €/hora

Baterias

As baterias utilizadas neste estudo são baterias da marca SDR. Esta marca de baterias foi selecionada devido à parceria previamente existente entre a Grupel e a empresa SDR. A tabela 4.4 apresenta as características técnicas e económicas do modelo de bateria selecionado.

Tabela 4.4: Baterias

Modelo	12 V 225 AH BLACK
Fabricante	SDR
Voltagem	12 V
Custo de aquisição e substituição	75 €/unid
Custos de operação e manutenção	3,75 €/unid/ano

Inversor

Por último, o inversor utilizado neste trabalho trata-se de um inversor da marca Fronius, com uma potência nominal de 20 kW, estando as suas características técnicas e económicas detalhadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Inversor

Modelo	Fronius SYMO 20.0-3-M
Fabricante	Fronius
Potência nominal	20 kW
Custo de aquisição e substituição	3255 €/unid
Custos de operação e manutenção	162,75 €/ano

4.1.2 Locais de estudo

Tal como referido anteriormente, esta análise será levada a cabo em três diferentes localizações do globo (Fig.4.1):

- Santa Cruz de La Sierra, Bolívia (1);
- Luanda, Angola (2);
- Pyay, Myanmar (3).

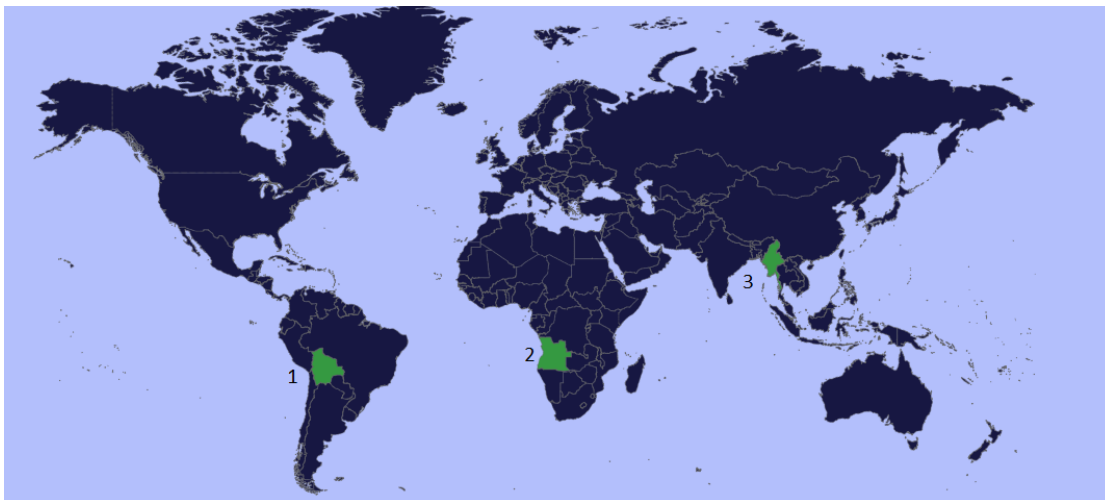


Figura 4.1: Localização dos locais de estudo

Estes locais foram selecionados em conjunto com a Grupel, por se tratarem de mercados onde a empresa vê possibilidades de inclusão do produto final. Por outro lado, estes locais dão também uma boa possibilidade de analisar três regiões com recursos muito diferentes, e em três continentes diferentes, algo que é vantajoso e permite fazer uma relação entre a viabilidade da utilização de energias renováveis e a posição do globo.

Santa Cruz de La Sierra

A cidade de Santa Cruz de La Sierra, a maior cidade da Bolívia, está localizada a $17^{\circ}49'S$ e $63^{\circ}9'W$ e tem um fuso horário de GMT-5. A Bolívia é um dos países mais pobres da América do Sul, dependendo principalmente de importações. Assim, e apesar de possuir uma das maiores reservas de gás natural do mundo, aproximadamente 36% de toda a população (cerca de 3,3 milhões de pessoas) não possui acesso a energia elétrica, sendo esta percentagem ainda superior nas zonas rurais [17]. Por esta razão, sistemas híbridos de energia podem ser uma solução eficaz para melhorar as condições de vida da população.

Luanda

A cidade de Luanda, capital de Angola, está localizada a $8^{\circ}55'S$ e $13^{\circ}25'E$, e tem o fuso horário de GMT+1. Atualmente Angola tem uma taxa de eletrificação no país de, apenas, 30%, valor extremamente baixo tendo sido feito, no entanto, um novo plano no país com o intuito de alcançar os 60% de eletrificação. Em locais mais remotos a população também deverá ser abastecida através de sistemas que utilizem sistemas fotovoltaicos, hídricos ou sistemas a Diesel [18]. Deste modo, a utilização de sistemas híbridos de energia pode ser uma utilização viável neste tipo de cenário.

Pyay

A cidade de Pyay, Myanmar, está localizada a 18°50'N e 95°16'E e tem um fuso horário de GMT+6.30. Em Myanmar, com uma população de cerca de 36 milhões de pessoas, 68% da população não tinha acesso a eletricidade em 2013, sendo que Myanmar é mesmo um dos países com mais baixa taxa de eletrificação em zonas rurais, chegando aos 28,2% apenas [19]. Deste modo, e tal como nos restantes locais em estudo, os sistemas híbridos podem vir a desempenhar um papel fundamental no crescimento sustentado deste país ao permitir levar energia elétrica a uma maior percentagem da população.

4.1.3 Condições climatéricas locais

Recurso Solar

A energia solar tem de ser fornecida ao HOMER como forma de um perfil de radiação média mensal. Esta informação pode ser obtida em diversos locais, no entanto, o programa inclui uma funcionalidade que permite a partir das coordenadas geográficas dos locais pretendidos obter a informação necessária (radiação e índice de clareza), sendo esses valores retirados da base de dados da NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Este será, assim, o procedimento utilizado neste trabalho.

Recurso Eólico

O recurso eólico, tal como o recurso solar, tem de ser fornecido ao HOMER sob a forma de um perfil mensal. Neste caso, o perfil mensal da velocidade média do vento. No entanto, por contraste com o recurso solar, o HOMER não possui uma base de dados de recursos eólicos, sendo necessário recolher esses dados.

Caso os dados eólicos horários não estejam disponíveis, como é o caso deste trabalho, o HOMER consegue criá-los a partir das médias mensais atribuídas pelo utilizador. Para isto, o software utiliza a distribuição de Weibull para alcançar os valores horários com relativa fiabilidade.

Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é frequentemente utilizada para caracterizar regimes de vento, tendo sido comprovado que fornece uma boa aproximação aos dados medidos. A distribuição de Weibull é caracterizada por duas funções, a função de distribuição cumulativa 4.1 e a função de densidade de probabilidade 4.2.

$$F(\nu) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\nu}{C} \right)^k \right] \quad (4.1)$$

$$f(\nu) = \frac{dF}{d\nu} = \left(\frac{k}{C} \right) * \left(\frac{\nu}{C} \right)^{k-1} * \exp \left[- \left(\frac{\nu}{C} \right)^k \right] \quad (4.2)$$

onde:

ν é a velocidade do vento [m/s]
 k é o fator de forma de Weibull
 C é o fator de escala de Weibull [m/s].

A utilização desta distribuição requer que se saiba o fator de forma, k , e o fator de escala, C . No entanto, para calcular estes valores é necessário ter-se uma base de dados extensa, algo que nem sempre é possível de obter. Desta forma, uma aproximação usual da distribuição de Weibull, é assumir-se que o fator de forma, k , tem o valor de 2. Esta aproximação é conhecida como distribuição de Rayleigh. A distribuição de Rayleigh consegue uma aproximação aceitável a regimes de vento, sendo por esta razão também bastante utilizada em sistemas de cálculo do potencial energético de vento [20]. A distribuição de Rayleigh pode também ser caracterizada pelas expressões da distribuição cumulativa 4.3 e da função de densidade de probabilidade 4.4.

$$F(\nu) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\nu}{\nu_m} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

$$f(\nu) = \left(\frac{\pi}{2} \right) * \left(\frac{\nu}{\nu_m^2} \right) * \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\nu}{\nu_m} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

onde:

ν_m é a velocidade média do vento [m/s]

Assim sendo, a distribuição de Rayleigh depende apenas da velocidade média do vento e da velocidade instantânea, não tendo outros parâmetros de ser calculados.

Por estas razões, neste trabalho, e dada a ausência de uma extensa base de dados sobre os recursos eólicos, será utilizada a distribuição de Rayleigh, ou seja, o fator de forma, k , a inserir no programa HOMER terá o valor de 2.

Parte II

Modelação do sistema

Capítulo 5

Modelação do sistema

Tal como referido anteriormente, o trabalho terá como foco de análise três diferentes locais, sendo eles: Bolívia, Angola e Myanmar. No entanto, apesar de ser necessário realizar simulações diferentes para cada um dos locais, alguns dos parâmetros a modelar no HOMER são transversais aos três locais. Desta forma, será descrito integralmente o caso de estudo 1, sendo que para os restantes casos de estudos serão apenas descritos os parâmetros que diferem desse caso de estudo inicial.

5.1 Caso de estudo 1 (Bolívia)

O sistema a analisar neste trabalho é idêntico em todos os casos de estudo, e será constituído por um gerador a Diesel, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, baterias e rede elétrica. A rede elétrica a simular, no entanto, será modelada com falhas, de forma a realizar uma melhor aproximação à rede que é habitualmente encontrada nestes locais. O sistema, modelado no software HOMER, está representado na Fig. 5.1.

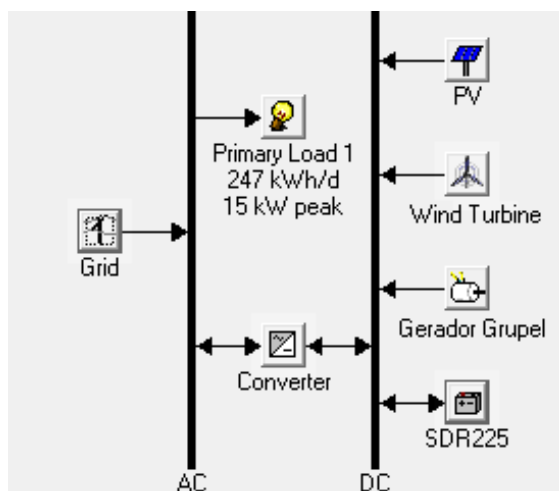


Figura 5.1: Sistema modelado no HOMER

5.1.1 Carga do sistema

O sistema híbrido a formar neste trabalho, tal como referido anteriormente, terá como função suportar a carga necessária para o correto funcionamento de uma torre de telecomunicações. As torres de telecomunicações geralmente têm dois perfis de cargas que necessitam de ser suportadas. Um desses perfis de carga prende-se com o habitual funcionamento da torre, que assegura as comunicações com outras torres. O outro perfil de carga prende-se com a ativação do sistema de ar condicionado presente na torre, o que leva a um aumento total da carga necessário. O sistema de ar condicionada apenas estará em funcionamento durante o dia (entre as 6h e as 20h).

Posto isto, importa agora para a modelação criar um perfil horário da carga a que o sistema estará sujeito e que necessitará de suplantar. Na Fig. 5.2 está representado o perfil horário utilizado na realização deste trabalho.

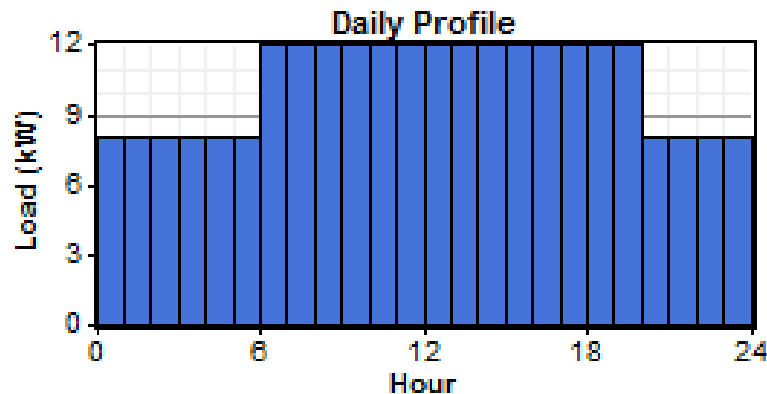


Figura 5.2: Perfil de carga horário

Este perfil horário foi fornecido pela Grupel e pode ser dividido em duas fases. A fase de noite, onde o ar condicionado se encontra desligado e que tem uma carga de cerca de 8 kW, e a segunda fase, ou fase de dia, em que o ar condicionado se liga e, assim, aumenta a carga necessária para cerca de 12 kW. No entanto, e para que o sistema a simular seja o mais real possível, e visto que um sistema real não é estático, ou seja, tem flutuações nas necessidades que o sistema encontra ao longo do dia, foram atribuídos dois tipos de variação, sendo elas uma variação horária e a outra uma variação diária. Desta forma, a carga apresentará flutuações, tais como as que são geralmente observadas num sistema real. Em ambas as variações foram utilizados valores de 5%, devido às torres de telecomunicações apresentarem uma flutuação de carga relativamente estável.

Os resultados que estas variações causam sobre o perfil diário, podem ser observados na fig. 5.3, onde está representado um mapa de dados com os valores horários de carga a que o sistema está sujeito ao longo de um ano.

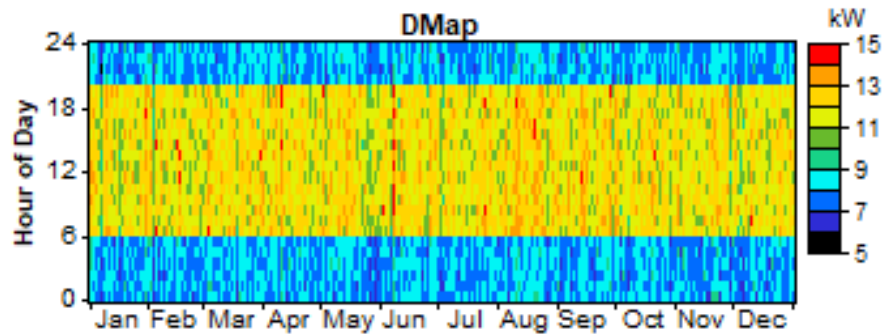


Figura 5.3: Mapa de dados

O sistema final apresenta, assim, um pico energético máximo de 15 kW e uma média de energia necessária por dia de 247 kWh/d.

5.1.2 Rede elétrica instável

A falha na rede de abastecimento de energia é um problema ainda bastante comum em países em desenvolvimento, tais como os que estão a ser estudados neste trabalho, desta forma, para recriar as condições encontradas nos locais a simular é necessário que a simulação tenha em conta possíveis falhas na rede em alturas onde o pico de energia é maior. O HOMER não permite aos seus utilizadores estabelecer um horário de disponibilidade da rede, no entanto, é possível manipular o sistema de modo a que a utilização de energia da rede não seja viável, durante um determinado período de tempo.

Para se realizar a caracterização da rede no software, entre outras coisas, é necessário definir tarifas diárias, podendo este variar ou não ao longo do dia. Desta forma, utilizando este mesmo tarifário é possível colocar um preço proibitivo (neste caso foi de 1000000 \$/kWh) nas horas em que queremos que a rede não forneça energia, criando assim uma situação de quebra de rede.

O horário atribuído no âmbito deste trabalho, foi definido pela empresa Grupel, por ser um horário usualmente encontrado em projetos desenvolvidos nas regiões em estudo. Este horário, como é visível na Fig. 5.4, funcionará, aos fins de semana, em pleno das 00h até às 17h, estando em baixo no tempo remanescente. Nos dias de semana haverá também falha de rede entre as 7h e as 9h, altura do dia onde se observa um pico energético.

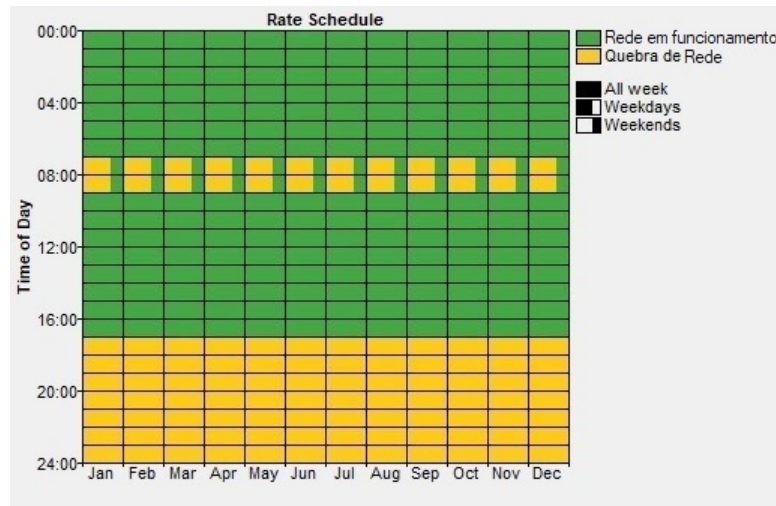


Figura 5.4: Horário de funcionamento da rede

5.1.3 Recurso Solar

Tal como referido no capítulo anterior, o recurso solar foi obtido a partir das coordenadas geográficas. O HOMER utiliza a base de dados da NASA Surface Meteorology and Solar Energy para obter os dados necessários para realizar a simulação. A média anual da radiação solar para esta região é de cerca de $4,41 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$. A Fig. 5.5 representa o perfil de radiação solar ao longo de um ano, bem como a variação do valor do índice de clareza.

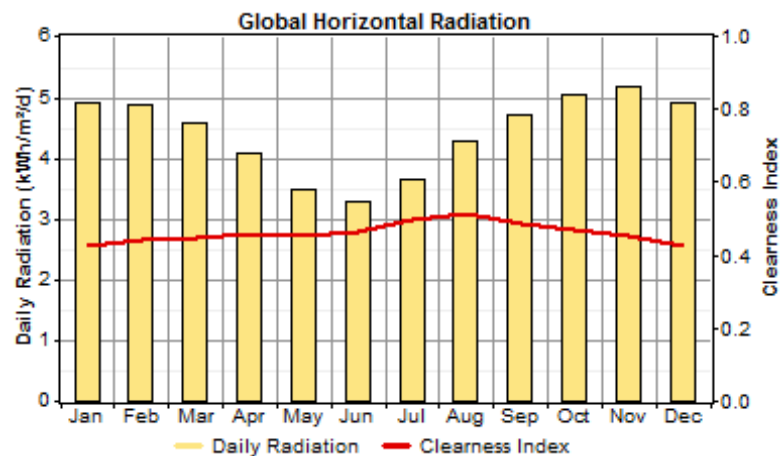


Figura 5.5: Perfil da radiação solar para Santa Cruz de La Sierra, Bolivia

Como podemos observar na Fig. 5.5, a radiação solar apresenta um máximo de $5,16 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ para o mês de Novembro, e um mínimo de $3,27 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ no mês de Junho.

5.1.4 Recurso Eólico

O recurso eólico deve, por sua vez, ser fornecido ao HOMER através de um perfil da média mensal da velocidade do vento (Fig. 5.6). Para este local, o perfil mensal foi retirado do site weatherbase [21].

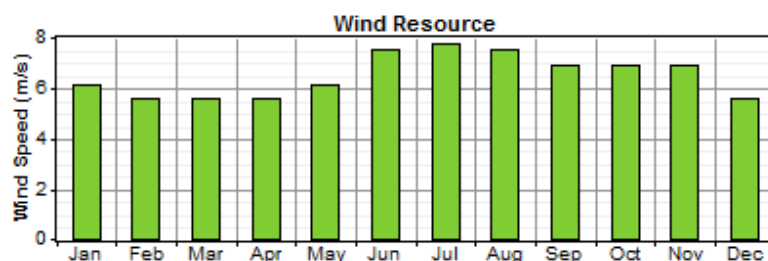


Figura 5.6: Médias mensais da velocidade do vento para Santa Cruz de La Sierra, Bolivia

Pela Fig. 5.6, o valor máximo de velocidade média do vento é de 7,78 m/s e observa-se no mês de junho, enquanto que o valor mínimo é 5,55 m/s e verifica-se no mês de Dezembro. Desta forma, a média anual de velocidade do vento é de, aproximadamente, 6,94 m/s. Estes valores mostram toda a potencialidade que a energia eólica possui neste local do globo.

5.1.5 Modelação de componentes

Todos os componentes utilizados neste estudo tiveram de ser modelados no software HOMER consoante determinados detalhes requisitados pelo mesmo. Desta forma, nesta secção do trabalho, serão ilustradas as principais informações atribuídas ao HOMER.

Painéis fotovoltaicos

A modelação de um painel fotovoltaico no HOMER é bastante simples, visto que este apenas necessita de informações relativas à potência, eficiência, custo e tempo de vida do painel.

Para além destas informações, é necessário definir a inclinação dos painéis (“slope”), o fator de escala entre o funcionamento dos painéis em testes controlados e os resultados reais (“derating factor”), o azimuth (“azimuth”), ou seja, a direção segundo a qual os painéis estão orientados e por fim, a fração de energia solar que é refletida pelo solo (“ground reflectance”). No que toca ao azimuth e à inclinação dos painéis, o HOMER calcula os valores que considera mais indicados consoante a localização geográfica onde o estudo está a ser efetuado, através das coordenadas geográficas desse local. Os dois restantes indicadores, o fator de escala e o índice de reflexão do solo foram tidos em conta os valores atribuídos em “default” pelo HOMER.

Assim, a modelação efetuada, bem como os valores atribuídos a cada um destes “inputs” podem ser observados na fig. 5.7. A figura mostra que, tal como havia sido referido na secção 4.1.1 deste trabalho, o tipo de painel a utilizar terá uma potência nominal de 300 W, tendo um custo de aquisição e substituição de 270 €/painel. O tempo de vida

do painel foi estimado em 20 anos, sendo que os custos de operação e manutenção foram estimados em cerca de 27 €/ano. O fator de escala será de cerca de 80%, e o grau de reflexão do solo de 20%. O HOMER calculou o grau de inclinação do painel e o azimute, sendo eles, respetivamente, 17,8167° e 180°. De acordo com o manual do HOMER, o facto de o azimute ser de 180° indica que o painel estará direcionado para norte.

Por último, mas de igual importância, devido a restrições de área onde podem ser colocados os painéis, a potência total nominal a ser instalada e estudada neste trabalho será de 1,80 kW, o que corresponderá a uma área de cobertura fotovoltaica de 12 m², equivalentes a seis painéis solares.

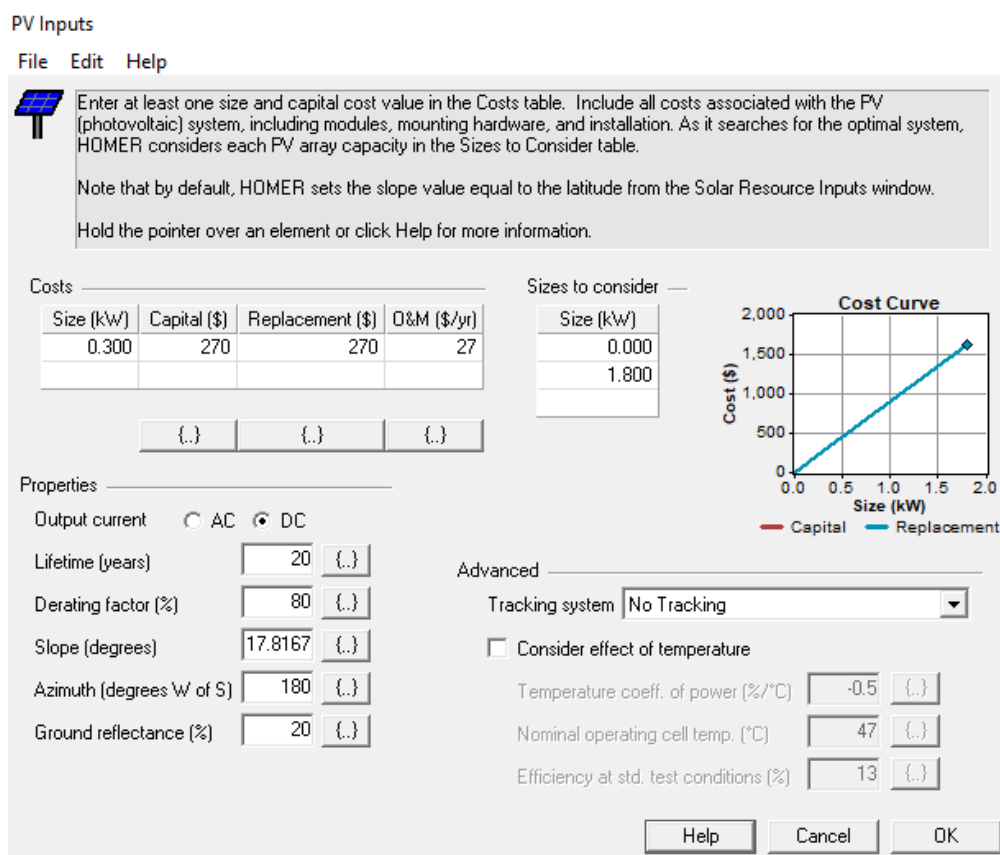


Figura 5.7: Modelação dos painéis fotovoltaicos

Turbina eólica

Para se modelar uma turbina eólica no HOMER, ao contrário dos painéis solares onde apenas é necessário indicar a potência e a eficiência dos mesmos, é necessário indicar alguns parâmetros mais técnicos e detalhados sobre a turbina como a curva de potência em adição aos parâmetros usuais como custos associados e tempo de vida.

Na fig.5.8 é possível observar a modelação que foi feita da turbina Bornay 6000, turbina essa que será utilizada neste trabalho.

Wind Turbine Inputs

File Edit Help

Choose a wind turbine type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include the cost of the tower, controller, wiring, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Turbine type: **Bornay 6000** Details... New... Delete

Turbine properties

Abbreviation: XLR (used for column headings)
 Rated power: 6 kW DC
 Manufacturer: Bornay
 Website: www.bornay.com

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	9043	9043	452

{.} {.} {.}

Other

Lifetime (yrs) 20 {.
 Hub height (m) 25 {.

Sizes to consider

Quantity
0
1
2

Power Curve

Cost Curve

Help Cancel OK

Figura 5.8: Modelação da Turbina eólica

Como se pode observar, os inputs principais para uma correta modelação de uma turbina eólica passam pelo preço, quer de aquisição quer de substituição, os gastos associados à operação e manutenção, tempo de vida e curva de potência. A turbina terá um custo de aquisição e substituição de 9043 €/uni e um tempo de vida de 20 anos. Os custos de operação e manutenção foram estimados em cerca de 452 €/ano. Por fim, foi considerado que o sistema ideal poderia apresentar 0,1 ou 2 turbinas.

A curva de potência desta turbina foi retirada do manual do fabricante, e pode ser observada com maior detalhe na figura 5.9.

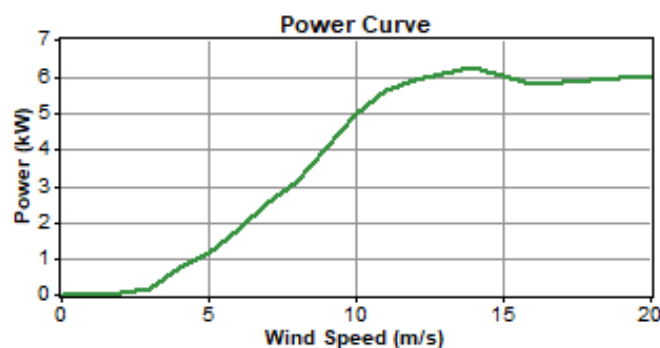


Figura 5.9: Curva de potência de Bornay 6000

Gerador

Para uma correta modelação de um gerador no HOMER, é necessário indicar algumas informações chave em relação ao mesmo. Na fig.5.10, é possível observar os inputs que foram atribuídos ao programa relacionados com o funcionamento do gerador.

Generator Inputs

File Edit Help

Choose a fuel, and enter at least one size, capital cost and operation and maintenance (O&M) value in the Costs table. Note that the capital cost includes installation costs, and that the O&M cost is expressed in dollars per operating hour. Enter a nonzero heat recovery ratio if heat will be recovered from this generator to serve thermal load. As it searches for the optimal system, HOMER will consider each generator size in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Cost | Fuel | Schedule | Emissions

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/hr)
15.700	5737	5737	0.070

Properties

Description: Gerador Grupel Type: ☐ AC ☒ DC

Abbreviation: Gera

Lifetime (operating hours): 30000

Minimum load ratio (%): 30

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
15.700

Cost Curve

Cost (000 \$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Help Cancel OK

Figura 5.10: Inputs relacionados com o funcionamento do gerador

Na fig.5.10 é possível observar as informações utilizadas para modelar o gerador em questão. O gerador irá funcionar em corrente contínua, com uma capacidade máxima de 15,7 kW, tendo uma esperança de vida de 30000 horas de trabalho. O gerador terá um custo de aquisição e substituição de 5737 €, e um custo de manutenção de cerca de 0,07 €/hora. Por último, sempre que o gerador entrar em funcionamento, terá um mínimo de carga de funcionamento de 30%, ou seja, o gerador nunca poderá funcionar a menos de 30% da sua carga máxima.

Pela mesma figura é também possível de observar que, para se modelar um gerador, é necessário indicar outras informações relacionadas com o combustível (“fuel”), horário de funcionamento (“schedule”) e as emissões libertadas pelo mesmo (“emissions”).

Na componente do combustível, foi indicado Diesel como combustível de funcionamento do gerador, enquanto que no que toca ao horário de funcionamento deste foi dada total liberdade ao HOMER para selecionar quando o gerador entraria em funcionamento,

de forma a tornar o sistema o mais económico possível.

Por fim, em relação às emissões, os inputs seleccionados foram os atribuídos por defeito pelo HOMER. Para determinar estes valores, o HOMER baseou-se num relatório interno efetuado na NREL por Erin Kassoy.

Baterias

A modelação das baterias no HOMER acaba por ser a mais trabalhosa, por ser aquela que necessita de maior número de informações relativas às mesmas. Na fig.5.11, está representada a modelação efetuada no HOMER da bateria seleccionada.

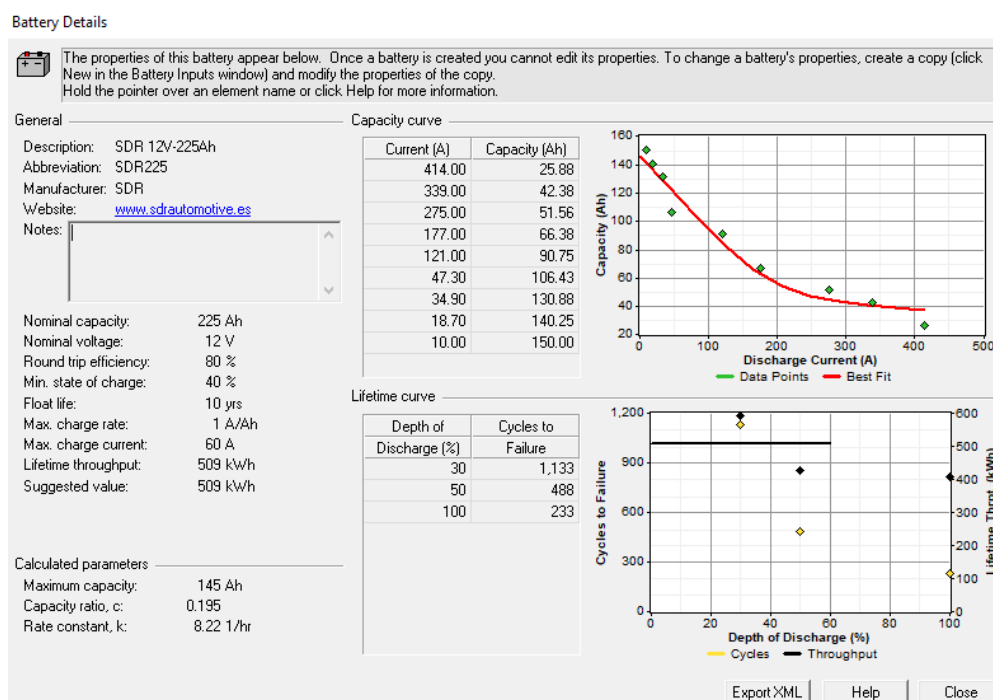


Figura 5.11: Modelação das baterias SDR 12V-225Ah

Importa referir que não foi possível obter junto do fornecedor SDR todas as informações necessárias para a modelação desta bateria. Assim, o procedimento efetuado foi o de utilizar a base de dados do HOMER no que toca a baterias, utilizando os detalhes técnicos já existentes para baterias do mesmo género de outro fornecedor, juntando um fator de segurança de 25%. Ou seja, foi aplicada uma redução de cerca de 25% em todos os valores relacionados com a capacidade de armazenar energia da bateria e com o seu tempo de vida.

Detalhada a modelação da bateria, importa agora definir os detalhes económicos e o dimensionamento a utilizar no estudo (Fig.5.12).

Battery Inputs
File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: **SDR 12V-225Ah** Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: SDR
Website: www.sdrautomotive.es

Nominal voltage: 12 V
Nominal capacity: 225 Ah (2.7 kWh)
Lifetime throughput: 509 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	75	75	3.75

{.}

Sizes to consider

Strings
0
1
2
3

Cost Curve

Cost (\$)

Quantity

Capital Replacement

Advanced

Batteries per string: 20 (240 V bus)

☐ Minimum battery life (yr): 4

Help Cancel OK

Figura 5.12: Dimensionamento do banco de baterias

Através desta figura, é possível observar que cada bateria terá um custo de aquisição e substituição de 75 €/uni. É também possível observar que cada “string” de baterias será composto por 20 baterias, e que em simulação estarão até um máximo de 3 “strings”.

Inversor

Por último, apresenta-se agora a modelação do inversor (Fig.5.13).

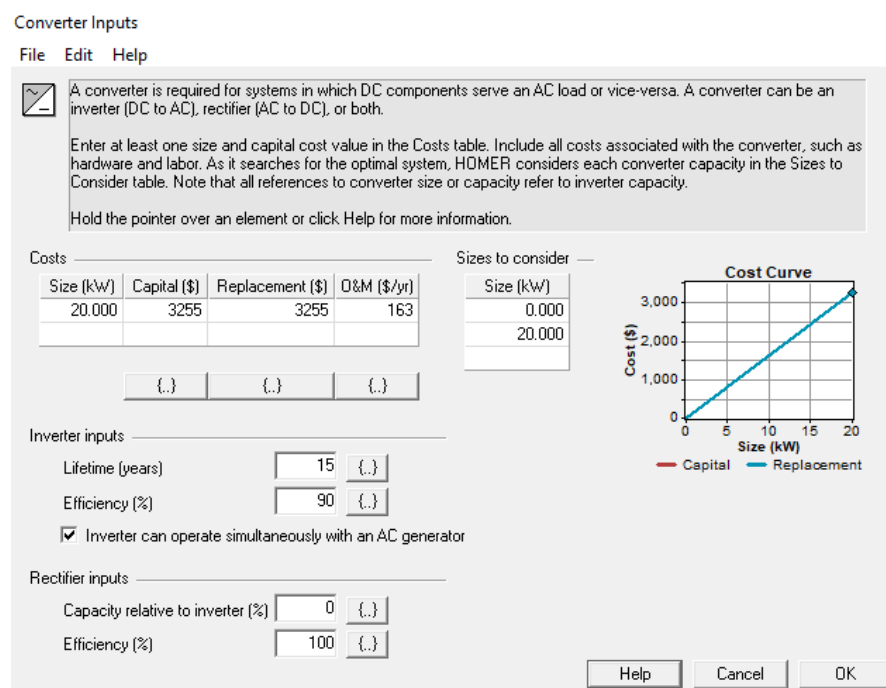


Figura 5.13: Modelação o inversor

Como é possível observar na fig.5.13, a modelação de um inversor é bastante simples, sendo necessário apenas indicar a potência do mesmo, a sua eficiência, tempo de vida e custos associados. Assim, este inversor, tal como referenciado no capítulo 4, possui uma capacidade de 20 kW, terá um custo de aquisição e substituição de 3255€ e custos de operação e manutenção de 162,75 €/ano. Terá uma estimativa de tempo de vida de 15 anos e uma eficiência a rondar os 90%. A eficiência real é inferior à eficiência nominal, devido ao inversor se encontrar a funcionar abaixo da voltagem nominal que era de 600 V. Assim, apesar desse funcionamento abaixo da voltagem nominal, a voltagem do sistema aqui estudado encontra-se dentro da banda de funcionamento do inversor, pelo que a sua escolha será adequada. Por último, importa referir que por se tratar de um inversor simples, apenas efetuará conversão de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC), pelo que a capacidade do retificador será de 0%.

5.1.6 Preço de diesel

Um outro fator muito importante no que toca aos geradores de energia é o combustível utilizado durante o funcionamento dos mesmos. O preço desse combustível pode influenciar decisivamente os custos associados ao funcionamento do mesmo. Desta forma, e para criar um sistema o mais fiável possível nos três locais de estudo, foi efetuada uma pesquisa de forma a descobrir, de forma o mais precisa possível, o preço do Diesel praticado em cada um destes locais. Assim, o preço obtido para Santa Cruz de La Sierra é de 0,44€/L [22].

5.1.7 Tarifário elétrico

Os custos relacionados com a rede elétrica, tal como no caso do Diesel, variam bastante de país para país, pelo que foi necessário obter preços adequadas a cada uma das regiões em estudo, assim, o preço da rede elétrica no caso de estudo 1, Santa Cruz de La Sierra, é de 0,151 €/kWh [23].

5.1.8 Estratégia de controlo de sistema, restrições e emissões

Nesta secção será detalhada a estratégia adotada, as penalizações correspondentes ao excesso de emissões e as restrições às quais o sistema deverá obedecer. Serão estas mesmas restrições que permitirão ao HOMER determinar se um sistema é viável ou não, sendo posteriormente ordenados de acordo com o processo de otimização.

Estratégia de controlo

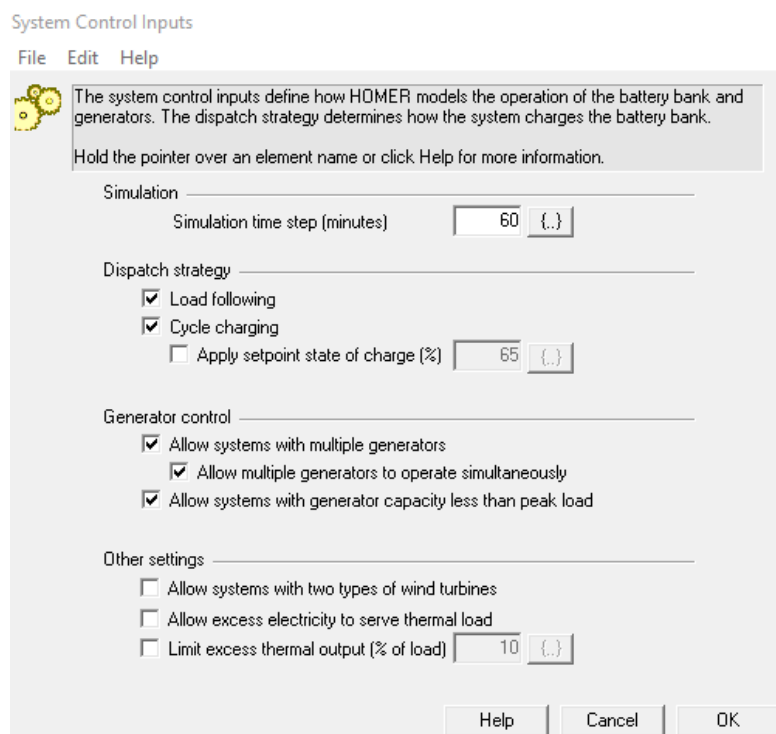
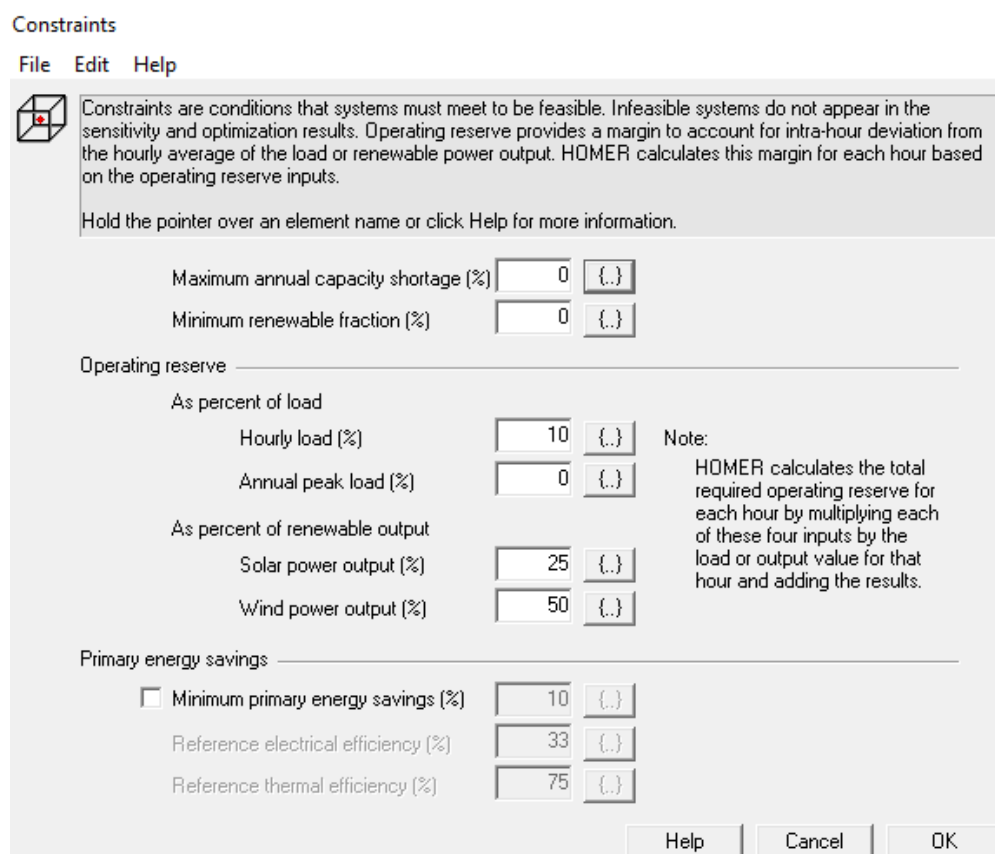


Figura 5.14: Estratégia de controlo do sistema

No que toca à estratégia adotada pelo HOMER, na fig.5.14, estão representadas as principais estratégias adotadas. Como é possível observar, foram efetuadas ambos os tipos de análise, “load following” e “cycle charging”. No segundo tipo de análise, importa também referir que não foi definido o valor até ao qual a bateria deveria carregar (“set point”) de forma a permitir ao HOMER que calcule o sistema mais rentável possível. O tempo de simulação será de 60 minutos, ou seja, serão calculados os resultados da simulação para cada uma das 8766 horas (equivalente a um ano). No que toca aos restantes

inputs acabam por não ser de elevada importância, porque neste trabalho apenas será utilizado um gerador e um tipo de turbinas eólicas, e não haverá cargas térmicas.

Restrições



Constraints
File Edit Help

Constraints are conditions that systems must meet to be feasible. Infeasible systems do not appear in the sensitivity and optimization results. Operating reserve provides a margin to account for intra-hour deviation from the hourly average of the load or renewable power output. HOMER calculates this margin for each hour based on the operating reserve inputs.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Maximum annual capacity shortage (%)

Minimum renewable fraction (%)

Operating reserve

As percent of load

Hourly load (%)

Annual peak load (%)

As percent of renewable output

Solar power output (%)

Wind power output (%)

Note:
HOMER calculates the total required operating reserve for each hour by multiplying each of these four inputs by the load or output value for that hour and adding the results.

Primary energy savings

☐ Minimum primary energy savings (%)

Reference electrical efficiency (%)

Reference thermal efficiency (%)

Help Cancel OK

Figura 5.15: Restrições aplicadas ao sistema

As restrições, tal como afirmado anteriormente, são as condições às quais o sistema terá de obedecer para ser considerado viável. Assim, na fig. 5.15 estão representadas as restrições aplicadas à simulação. Destas destacam-se o facto de se produzir um mínimo de 10% de sobrecarga, para fazer face a possíveis flutuações momentâneas na carga. Destaca-se também o facto de não ser permitida qualquer falha no sistema, e por fim o facto de não haver mínimo de energia renováveis, permitindo assim sistemas onde as mesmas não existem, como é o caso de sistemas onde apenas existe o gerador, ou onde existe o gerador e a rede.

Emissões

Na secção emissões do HOMER é possível aplicar penalizações caso as emissões de determinados componentes ultrapassem um certo valor. Neste trabalho, no entanto, não foi atribuída nenhuma penalização.

5.1.9 Pressupostos

Nesta secção estarão apresentados os pressupostos utilizados neste trabalho:

- Tempo de vida do sistema foi assumido como sendo 20 anos;
- O tempo de vida dos painéis solares e das turbinas eólicas foi assumido como sendo 20 anos, e o do inversor de 15 anos;
- Após consulta de diversos trabalhos ([9],[10]) os custos de operação e manutenção, foram assumidos, de uma perspectiva pessimista, como sendo 10% para os painéis fotovoltaicos, 5% para as turbinas eólicas, inversor e baterias.

5.2 Caso de estudo 2 (Angola)

A modelação do caso de estudo 2 em tudo é semelhante ao caso de estudo inicial, à exceção dos recursos renováveis disponíveis no local e dos preços de combustível e de eletricidade praticados. Posto isto, em seguida estarão descritos os detalhes dessas alterações na modelação do caso de estudo em Luanda.

5.2.1 Recurso Solar

O procedimento utilizado neste local foi idêntico ao anterior, tendo sido utilizadas as coordenadas geográficas de Luanda. A média anual da radiação solar para esta região é de cerca de $4,77 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$. A Fig. 5.16 representa o perfil de radiação solar ao longo de um ano, bem como a variação do valor do índice de nebulosidade.

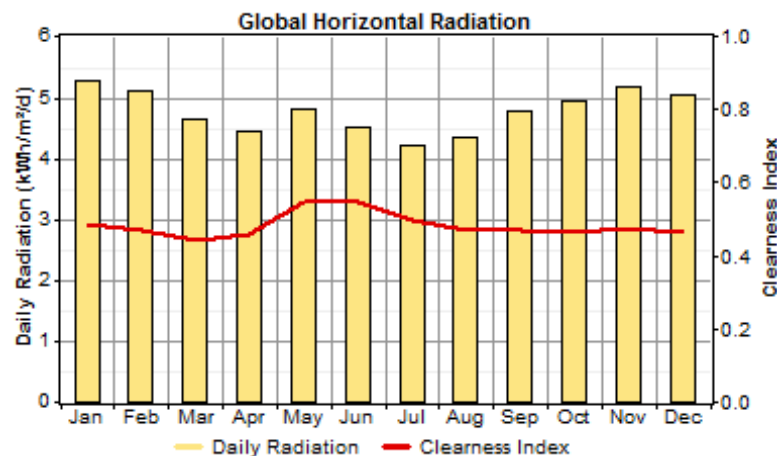


Figura 5.16: Perfil da radiação solar para Luanda, Angola

Como podemos observar na Fig. 5.16, a radiação solar apresenta um máximo de $5,27 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ para o mês de Janeiro, e um mínimo de $4,21 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ no mês de Julho.

5.2.2 Recurso Eólico

Para Luanda, o perfil mensal do recurso eólico, representado na Fig. 5.17, foi retirado desta vez do website worldweatheronline [24].

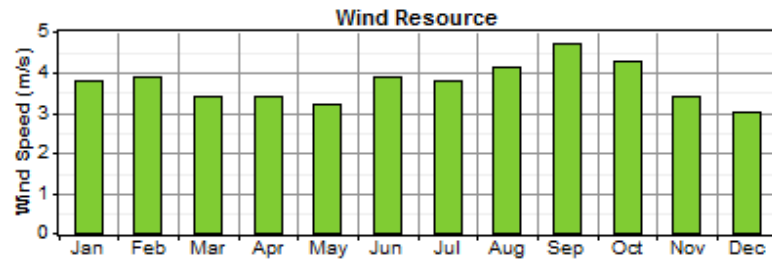


Figura 5.17: Médias mensais da velocidade do vento para Luanda, Angola

Pela Fig. 5.17, retira-se que o valor máximo de velocidade média do vento é de 4,69 m/s sendo observado no mês de Setembro, enquanto que o valor mínimo é 2,99 m/s e verifica-se no mês de Dezembro. Esta região apresenta uma média anual de 3,74 m/s.

5.2.3 Preço de diesel e tarifa elétrica

O preço do Diesel e da rede elétrica para o segundo caso de estudo em Luanda, ao que foi possível apurar, serão, respetivamente, de cerca de 0,69 €/L [22] e de 0,064 €/kW [23].

5.3 Caso de estudo 3 (Myanmar)

A modelação do caso de estudo 3 em tudo é semelhante às restantes, variando os recursos disponíveis e os preços de abastecimento da rede elétrica e de obtenção do diesel. Desta forma, e tal como no caso de estudo 2, nesta secção apenas será descrita a modelação dos recursos renováveis e os preços de combustível e da rede elétrica.

5.3.1 Recurso Solar

O procedimento utilizado neste local foi idêntico ao anterior, tendo sido utilizadas as coordenadas geográficas de Pyay. A média anual da radiação solar para esta região é de cerca de 5,26 kWh/m²/d. A Fig. 5.18 representa o perfil de radiação solar ao longo de um ano, bem como a variação do valor do índice de clareza.

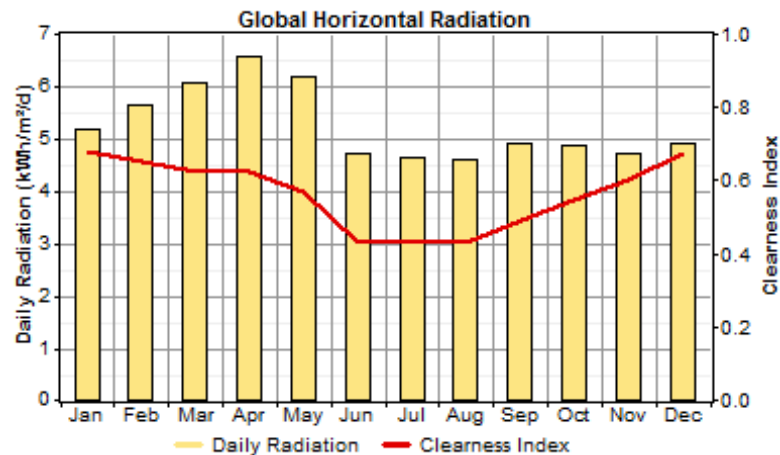


Figura 5.18: Perfil da radiação solar para Pyay, Myanmar

Como podemos observar na Fig. 5.18, a radiação solar apresenta um máximo de 6,59 kWh/m²/d para o mês de Abril, e um mínimo de 4,586 kWh/m²/d no mês de Agosto.

5.3.2 Recurso Eólico

O procedimento utilizado foi semelhante à Bolívia, tendo os valores sido obtidos através do website weatherbase [21].

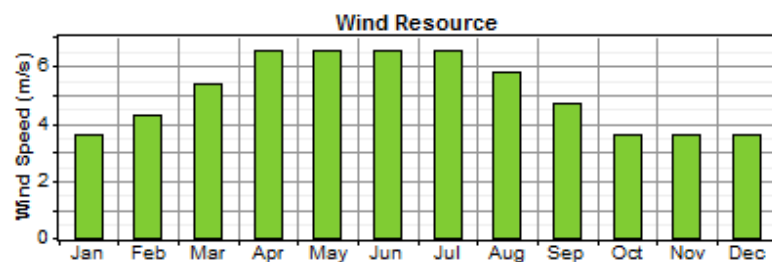


Figura 5.19: Médias mensais da velocidade do vento para Pyay, Myanmar

Pela Fig. 5.19, o valor máximo de velocidade média do vento é de 6,50 m/s e observa-se nos meses de abril, maio, junho e julho, enquanto que o valor mínimo é 3,61 m/s e verifica-se no mês de Janeiro. Este local tem uma média anual de velocidade do vento de cerca de 5,05 m/s.

5.3.3 Preço de diesel e tarifa elétrica

O preço do Diesel e da rede elétrica para o segundo caso de estudo em Luanda, ao que foi possível apurar, serão, respetivamente, de cerca de 0,44 €/L [22] e de 0,083 €/kWh [23].

5.4 Dimensões a simular

O HOMER, tal como detalhado no capítulo 3, efetua uma otimização de sistemas indicando aquele que cumpre os requisitos necessários, com o menor preço total do sistema. Assim, é necessário dimensionar o sistema, atribuindo diversas variações quer na quantidade, quer na capacidade dos diferentes sistemas. Assim, na tabela 5.4, estão detalhados as diferentes variáveis anexadas a cada um dos componentes presentes no sistema.

Tabela 5.1: Dimensões possíveis do sistema

	Componentes				
	Painéis (kW)	Turbina (número)	Gerador (kW)	Baterias (número de strings)	Inversor (kW)
Dimensões a estudar	0	0	0	0	20
	1.80	1	15.7	1	
		2		2	
				3	

Parte III

Resultados e Discussão

Capítulo 6

Resultados

Após a modelação e simulação efetuada no HOMER importa agora analisar com detalhe os resultados. As conjugações de sistemas possíveis são diversas, perfazendo um total de 192 simulações realizadas no software, sendo de elevada importância agrupar estas mesmas simulações, de forma a simplificar e resumir a análise dos resultados. Desta forma, foram criados 4 grandes grupos de sistemas viáveis para o caso de estudo, variando a constituição dos mesmos:

- Grupo 1 - Painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, gerador a diesel e rede elétrica;
- Grupo 2 - Painéis fotovoltaicos, gerador a diesel e rede elétrica;
- Grupo 3 - Turbinas eólicas, gerador a diesel e rede elétrica;
- Grupo 4 - Gerador a diesel e rede elétrica (caso referência).

Importa também referir que em cada um destes casos, existirá um inversor de corrente CC-CA, e que a presença de banco de baterias ou não, será determinada pelo custo do sistema final, ou seja, se a presença do banco de baterias for benéfica ao custo atual líquido, estas farão parte do sistema final.

6.1 Santa Cruz de La Sierra

Nesta secção estarão representados os resultados obtidos para o caso de estudo 1 (Santa Cruz de La Sierra). A partir destes resultados é possível retirar variadas ilações, sendo que o melhor sistema pode variar de acordo com o objetivo pretendido para o mesmo, ou seja, um sistema pode ser mais económico e, no entanto, apresentar piores resultados no que toca às emissões de gases com efeito nocivo para o ambiente. Assim, e de forma a tentar analisar os resultados da forma mais ampla possível, serão utilizadas diferentes abordagens, tais como: menor custo de aquisição, menor quantidade de emissões libertadas, menor custo atual líquido do sistema e maior percentagem de energias renováveis.

Posto isto, na tabela 6.1 estão representados os resultados otimizados obtidos para cada um dos grupos (1-4) que irão ser analisados, bem como a constituição final de cada um deles.

Tabela 6.1: Resultados caso de estudo 1

PV (kW)	Turbina (número)	Gera (kW)	Bat (número)	Conversor (kW)	Rede Elétrica (kW)	Estratégia de funcionamento	Capital Inicial (€)	Custo de operação (€/ano)	NPC (€)	COE (€/kWh)	Fração renovável	Diesel (L/ano)	Gera (horas)
1.80	2	15.7	20	20	1000	CC	30198	9355	137499	0.133	0.51	6802	1823
	2	15.7	20	20	1000	CC	28578	9513	137694	0.133	0.49	6907	1842
1.80		15.7		20	1000	LF	10612	15003	182692	0.177	0.03	12399	3077
		15.7		20	1000	LF	8992	15156	182832	0.177	0.00	12467	3077

6.1.1 Custo de aquisição do sistema

Como é possível observar na tabela 6.1, o sistema que apresenta o menor custo de aquisição é o sistema referência, composto pelo gerador a diesel e pela rede elétrica. Este sistema necessita de um capital inicial de 8992 €, de forma a adquirir um gerador e o inversor de energia. O segundo sistema mais económico no que toca à sua aquisição é o sistema do grupo 2. Este sistema, terá um custo de 10612 € distribuídos pelo gerador a diesel, 1,80 kW de painéis solares e um inversor. O terceiro sistema na ordem será o sistema composto por um gerador a diesel, duas turbinas eólicas de 6 kW cada, uma string de vinte baterias e pela rede elétrica (grupo 3) e terá um custo inicial de 28578 €. Por fim, o sistema mais caro inicialmente é o sistema que contém todos os componentes disponíveis na simulação, e é composto por 1,80 kW de painéis solares, duas turbinas eólicas de 6 kW cada, uma string de 20 baterias, um gerador a diesel e pela rede elétrica. Este sistema terá assim um custo total de aquisição de 30198€, o valor mais elevado dos quatro sistemas em estudo.

6.1.2 Menor custo atual líquido (NPC)

Tal como referido em capítulos anteriores deste trabalho, o HOMER utiliza o custo atual líquido (NPC) para ordenar economicamente as diversas soluções encontradas para o caso em estudo.

Posto isto, e através dos resultados apresentados na tabela 6.1 é possível ordenar os diferentes sistemas de acordo com o seu NPC. Assim, é possível observar que o sistema com o menor custo atualizado é o sistema do grupo 1, com um custo de 137499 €. Em seguida segue-se o grupo 3, com um custo de 137694 €. O terceiro grupo no que toca ao custo atual líquido é o grupo 2, com um valor de 182692 €. Por fim, encontra-se o grupo de referência que é o que apresenta, neste caso, o custo atual líquido mais elevado, sendo este de 182832 €.

6.1.3 Sistema com maior percentagem de energias renováveis

Tal como referido no início deste capítulo, outra das observações que se pode efetuar em relação aos sistemas viáveis para o caso de estudo prende-se com a percentagem de energia obtida a partir de energias renováveis (fração energética renovável). Esta fração é calculada pelo HOMER dividindo a energia produzida pelas energias renováveis pela energia total produzida. Assim, pela figura é possível observar que o sistema com maior fração renovável, como era esperado, é aquela que tem na sua constituição tanto os painéis solares como as turbinas eólicas como apoio aos meios de energia fósseis (grupo 1). Para este caso, a fração energética renovável é de cerca de 0,51. Em seguida, vem o grupo 3, que contém as turbinas eólicas, que apresenta uma fração renovável de aproximadamente 0,49. Com uma fração renovável muito inferior aos dois sistemas referidos anteriormente

seguem-se o grupo 2 e o grupo referência, com frações de, respetivamente, 0,03 e 0.

Através da diferença nos resultados entre o grupo 2 e o grupo 3, é possível perceber que, tal como esperado devido à elevada diferença de capacidade, a energia produzida pelas turbinas eólicas é bastante superior à energia produzida pelos painéis fotovoltaicos.

6.1.4 Comparação de emissões libertadas

Outro aspeto importante quando se fala em projetos deste âmbito prende-se com os problemas de cariz ambiental que usualmente os sistemas à base de combustíveis fósseis, como é o caso do nosso grupo de referência, enfrentam. Posto isto, na tabela 6.1.4 estão representados os dados de algumas das emissões libertadas por cada um dos grupos em estudo.

Tabela 6.2: Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 1

Poluente	Emissões (kg/ano)			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Dióxido de carbono	33742	63303	34981	64493
Monóxido de carbono	44,2	80,6	44,9	81
Dióxido de enxofre	117	223	123	228

Como é possível observar na tabela , os grupos 1 e 3 apresentam valores substancialmente inferiores aos do grupo referência (grupo 4), com reduções de cerca de 47%, nas emissões de dióxido de carbono, em ambos os casos.

6.1.5 Análise de resultados

Como é possível analisar a partir das diferentes análises efetuadas, o grupo de referência, formado pelo gerador e pela rede elétrica, apesar de apresentar o custo inicial mais reduzido, é aquele que tem o custo atual líquido superior, bem como o que apresenta piores resultados no que toca às emissões libertadas. Por contrapartida, o grupo 1, composto por turbinas eólicas, painéis solares, gerador a diesel e rede elétrica, apesar de necessitar de um capital inicial cerca de 335 % superior ao caso referência, apresenta uma redução do custo atualizado do sistema de, aproximadamente, 25 %. Para além disso, este grupo apresenta ainda melhorias significativas no que toca às emissões libertadas, reduzindo em cerca de 47 % a quantidade de dióxido de carbono libertado por ano, 45% as emissões de monóxido de carbono e em 49% de dióxido de enxofre.

6.2 Luanda

Nesta secção estarão representados os resultados obtidos para o caso de estudo 2. Para este segundo caso de estudo, as abordagens aos resultados serão as mesmas, analisando o custo inicial, custo atual líquido do sistema, fração energética renovável e por fim as emissões libertadas de cada um dos grupos de soluções.

Na tabela 6.2, estão representados os resultados obtidos para cada um dos grupos, apresentado também a solução otimizada de cada um deles.

Tabela 6.3: Resultados caso de estudo 2

PV (kW)	Turbina (número)	Gera (kW)	Bat (número)	Conversor (kW)	Rede Elétrica (kW)	Estratégia de funcionamento	Capital Inicial (€)	Custo de operação (€/ano)	NPC (€)	COE (€/kWh)	Fração renovável	Diesel (L/ano)	Gera (horas)
		15.7		20	1000	LF	8992	13124	159518	0.154	0.00	12467	3077
1.80		15.7		20	1000	LF	10612	13106	160940	0.156	0.03	12393	3077
	1	15.7		20	1000	LF	18035	12709	163811	0.158	0.10	11718	3077
1.80	1	15.7		20	1000	LF	19655	12692	165231	0.160	0.12	11644	3077

6.2.1 Custo de aquisição do sistema

Tendo em conta os resultados apresentados, é possível observar que o sistema com o menor custo de aquisição é o grupo referência. Este grupo, que não apresenta na sua constituição nenhuma energia renovável, terá um custo de aquisição de 8992 €. O segundo grupo no que toca ao capital inicial necessário é o grupo 2, constituído por painéis solares, gerador e rede elétrica, tendo um custo de 10612 €. Com um custo de aquisição significativamente superior aos grupos anteriores seguem-se o grupo 3 e o grupo 1, com custos de 18035 € e 19655 €, respetivamente.

Estes resultados em tudo são semelhantes ao caso de estudo 1, devido ao facto de que os preços de compra de cada um dos constituintes dos diversos sistemas não se alterarem de região para região. No entanto, o sistema ótimo de cada um dos grupos pode variar, variando assim também o seu custo inicial.

6.2.2 Menor custo atual líquido (NPC)

Tal como no primeiro caso de estudo, o procedimento aplicado na determinação do sistema mais rentável economicamente foi o mesmo. Assim, pela tabela 6.2, pode-se observar que o sistema cujo custo atual líquido (NPC) é mais baixo é o sistema do grupo de referência. Este grupo apresenta um NPC no final do tempo de vida do sistema de 159518 €. Em seguida, vem o sistema do grupo 2, que é composto pelo grupo referência, com a adição de energia fotovoltaica. Este grupo tem um custo atualizado de 160940 €. O grupo 3, composto por energia eólica em conjunto com o grupo referência, apresenta um custo de 163811 €. Por fim, o sistema do grupo 1 que apresenta as duas energias renováveis, utilizadas neste estudo, na sua composição é o sistema cujo custo atual líquido é mais elevado, com um total de 165231 €.

6.2.3 Sistema com maior percentagem de energias renováveis

No que toca à percentagem de energias renováveis presente em cada uma das soluções otimizadas encontradas, o sistema que se sobrepõe aos restantes é o sistema do grupo

1, com 12 % da energia produzida a provir de fontes renováveis. Em segundo lugar, aparece o sistema do grupo 3, com uma percentagem renovável de 10 %. O sistema do grupo 2 apresenta uma percentagem de 3 % de energias renováveis, e por fim, o grupo de referência, visto que não possui qualquer fonte de energia renovável na sua constituição apresenta uma fração renovável nula.

6.2.4 Comparação de emissões libertadas

Para o caso de estudo 2, foi também efetuada uma análise das emissões libertadas pelos diversos grupos de soluções. Os resultados obtidos no HOMER estão representados na tabela 6.2.4.

Tabela 6.4: Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 2

Poluente	Emissões (kg/ano)			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Dióxido de carbono	32653	34837	32925	35108
Monóxido de carbono	75,7	80,6	76,2	81
Dióxido de enxofre	203	222	209	228

Da tabela anterior, é possível observar que os grupos 1 e 2, tal como no caso de estudo 1 apresentam níveis de emissões inferiores aos do grupo referência (grupo 4). Esta redução deve-se à presença de energias renováveis, consideradas como energias “limpas” e, apesar de não ser muito significativa, representa melhorias em todos os tipos de poluentes estudados, com uma redução de cerca de 7 % da emissão de Dióxido de carbono, para o grupo com os melhores resultados.

6.2.5 Análise de resultados

Com o concluir das diferentes análises é possível observar que, para o caso de estudo 2, não existe um sistema ideal, dependendo muito do pretendido pelo utilizador final. Assim, caso o objetivo final do sistema seja que este apresente os melhores resultados económicos possíveis, deve investir no sistema do grupo referência, que é aquele que a longo prazo apresenta a solução mais rentável financeiramente (menor NPC). Por outro lado, caso o objetivo passe por ter um sistema “verde”, a solução passa pelo sistema do grupo 1, que é aquele que apresenta os melhores resultados em relação às emissões libertadas e também o sistema que tem a maior quantidade de energia obtida a partir de energias renováveis, no entanto, é também o sistema com os piores resultados financeiros. Por fim, caso se pretenda uma solução mista, que apresente bons resultados tanto financeiros como económicos, é possível utilizar tanto o sistema do grupo 2, como do grupo 3, que apresentam um misto de resultados quer financeiros quer ambientais.

6.3 Myanmar

Nesta secção estarão representados os resultados obtidos para o caso de estudo 3. Para este terceiro e último caso de estudo, as abordagens aos resultados serão as mesmas dos casos anteriores, analisando o custo inicial, custo atual líquido do sistema, fração energética renovável e por fim as emissões libertadas de cada um dos grupos de soluções.

Na tabela 6.3, estão representados os resultados obtidos para cada um dos grupos para este caso de estudo, apresentado também a solução otimizada de cada um deles.

Tabela 6.5: Resultados caso de estudo 3

PV (kW)	Turbina (número)	Gera (kW)	Bat (número)	Conversor (kW)	Rede Elétrica (kW)	Estratégia de funcionamento	Capital Inicial (€)	Custo de operação (€/ano)	NPC (€)	COE (€/kWh)	Fração renovável	Diesel (L/ano)	Gera (horas)
	2	15,7	20	20	1000	CC	28578	8936	131073	0,127	0,34	8807	2391
1,80	2	15,7	20	20	1000	CC	30198	8862	131839	0,127	0,37	8712	2377
		15,7		20	1000	LF	8992	11131	136668	0,132	0,00	12393	3077
1,80		15,7		20	1000	LF	10612	11065	137525	0,133	0,03	12395	3077

6.3.1 Custo de aquisição do sistema

Os resultados do caso de estudo 3 presentes na figura, permitem observar que o sistema com o menor custo inicial é o sistema do grupo de referência, tal como aconteceu nos casos de estudo anteriores. Este apresenta um custo inicial de 8992 €, distribuídos pelo gerador a diesel e pelo inversor necessário para transformar a energia de corrente contínua para corrente alternada. Em seguida vem o sistema do grupo 2, que é idêntico ao grupo referência, tendo, no entanto, na sua constituição a adição de painéis solares (6 neste caso), perfazendo um investimento inicial de 10612 €. O caso do grupo 3 apresenta-se em terceiro no que toca ao investimento inicial com um custo de 28578 €, repartidos pelo gerador a diesel, duas turbinas eólicas, vinte baterias e um inversor de corrente. Por fim, o grupo que apresenta o maior investimento inicial necessário é o grupo 1, que adiciona painéis solares à constituição do sistema do grupo 3. Este sistema do grupo 1 tem um custo inicial de 30198 €.

6.3.2 Menor custo atual líquido (NPC)

Para o último caso de estudo o procedimento a utilizar nesta secção será o mesmo. Assim, e ordenando os quatro grupos de sistemas em análise, aquele cujo custo atual líquido é inferior é o sistema do grupo 3, formado pelo gerador, rede elétrica, duas turbinas eólicas e por baterias. Este sistema tem um custo de 131073 €. O segundo grupo com um custo mais reduzido é o sistema do grupo 1. Este grupo, composto por duas turbinas eólicas, 1,80 kW de painéis fotovoltaicos e 20 baterias, juntamente com o gerador e a rede elétrica apresenta um NPC de 131839 €. O grupo referência surge em terceiro lugar, com um custo atualizado de 136668 €, e o grupo 2, composto por painéis solares em adição ao gerador a diesel e à rede elétrica aparece em último lugar com um custo atualizado de 137525 €.

6.3.3 Sistema com maior percentagem de energias renováveis

No que toca à percentagem renovável da energia produzida pelos diversos sistemas para o caso de estudo 3, em Myanmar, o sistema que apresenta os melhores resultados é

a solução otimizada do grupo 1. Este sistema tem uma percentagem de 37 % da energia a provir de fontes renováveis. Em seguida, o sistema do grupo 3, com energia eólica apenas na sua constituição, tem 34 % de toda a energia produzida a provir dessa mesma fonte. Em seguida, o sistema que tem como fonte renovável a energia solar (grupo 2), apresenta apenas uma fração renovável de 3 %, o que mais uma vez comprova a baixa potência instalada de painéis solares. Por último, tal como esperado, o grupo referência não apresenta qualquer percentagem de energia renovável.

6.3.4 Comparação de emissões libertadas

Para o caso de estudo 3, tal como nos casos de estudo anteriores, foi também efetuada uma análise das emissões libertadas pelos diversos grupos de soluções. Os resultados obtidos no HOMER estão representados na tabela 6.3.4.

Tabela 6.6: Valores de emissões de cada um dos grupos em estudo, para o caso de estudo 3

Poluente	Emissões (kg/ano)			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Dióxido de carbono	34949	50593	35934	51532
Monóxido de carbono	56,6	80,6	57,2	81
Dióxido de enxofre	150	221	157	228

Desta tabela advém que o sistema do grupo 1 é aquele com a menor quantidade de gases libertados, algo que vem também de acordo com a secção anterior, onde é também o grupo com a maior percentagem de energia produzida originária de fontes renováveis. Pela mesma ordem de pensamento, o grupo 3 é o sistema com os melhores resultados de emissões a seguir ao grupo 1. Seguem-se o grupo 2 e o grupo 4 (grupo referência). Importa denotar que os resultados obtidos para o grupo 1 são bastante positivos, por representarem uma redução de cerca de 32 % da quantidade de CO₂ libertado.

6.3.5 Análise de resultados

Após a descrição dos resultados, é agora importante analisa-los em conjunto, de forma a tentar determinar qual o sistema que melhor se ajusta a este caso de estudo. Analisando os resultados obtidos é possível observar que não existe um sistema ótimo, que apresente os melhores resultados em todas as categorias, no entanto, tanto o sistema do grupo 1, como o sistema do grupo 3, apresentam bons resultados em todas as diferentes categorias. O grupo 1, por exemplo, apresenta os melhores resultados ambientais, com uma percentagem de 37% de toda a energia produzida a originar em fontes renováveis, e apresenta também o segundo melhor resultado em termos de NPC, com um custo atualizado ligeiramente superior ao sistema com os melhores resultados (aumento inferior a 1%). O grupo 3, por sua vez, apresenta o menor custo atual líquido de todos os sistemas otimizados, tendo, em contrapartida, o segundo resultado em termos ambientais (34% de energia produzida originária de fontes renováveis). Posto isto, ambos os sistemas aqui analisados poderiam ser utilizados neste caso de estudo, por não apresentarem diferenças

significativas.

6.4 Estudo de sensibilidade aos parâmetros económicos

Neste capítulo foi realizado um estudo de sensibilidade aos parâmetros económicos, mais especificamente às taxas de juro, tendo esta sido variada em três valores diferentes, sendo eles: 6% (o valor utilizado nos restantes resultados analisados), 3% e 12%. Os resultados obtidos estão presentes nos anexos A1(Santa Cruz de La Sierra), A2(Luanda) e A3 (Pyay), sendo que nesta secção apenas serão analisados os mesmos.

Analisando agora os resultados de uma forma global, foi possível observar que com o aumentar do valor da taxa de juro há uma redução do custo atual líquido. Esta redução deve-se à taxa de inflação a que o dinheiro está sujeito ao longo do tempo de vida do sistema. Esta taxa de inflação faz com que o custo de operar o sistema no primeiro ano seja superior ao mesmo custo passados, por exemplo, 10 anos.

Outro aspeto que se pode retirar dos resultados do estudo de sensibilidade foi que com o aumentar do valor da taxa de juro as energias renováveis perdiam rentabilidade, ou seja, com o aumentar do valor das taxas de juro, o grupo referência (energia não renovável) fica mais vantajoso em relação aos restantes grupos. Este aspeto, no que toca ao primeiro caso de estudo, entre taxas de juro de 6% e 12%, não alterou os resultados, continuando o sistema ótimo a ser o sistema do grupo 1, no entanto, a diferença de NPC entre este grupo e o grupo referência diminuiu, passando dos 25% para 19%. Estes resultados são corroborados com a passagem das taxas de juro de 6% para 3%, onde se verificou que a diferença de custo atual líquido entre o grupo 1 e o grupo referência registou um aumento, passando de 25% para os 28%, respetivamente.

Para os restantes casos de estudo a variação de resultados foi a mesma, havendo também um reduzir do custo atual líquido do sistema otimizado com o aumentar das taxas de juro, assim como uma redução nos ganhos económicos obtidos a partir das energias renováveis, sendo que no caso de estudo 3, onde o sistema ótimo do ponto de vista financeiro para uma taxa de juros de 6% era o do grupo 3, com o variar da taxa de juros para 12%, houve uma alteração, passando a ser o grupo referência o mais rentável no final do tempo de vida do sistema.

Com estes resultados pode-se observar que o aumentar das taxas de juros beneficia mais os sistemas de energia fóssil, por comparação com os sistemas que utilizam energias renováveis.

Capítulo 7

Conclusões

O aumento da atenção dada aos problemas derivados da constante utilização de combustíveis fósseis tem levado a um crescimento exponencial na utilização de energias renováveis um pouco por todo o globo, e com diversas aplicações. No entanto, é necessário analisar e otimizar os sistemas renováveis, de forma a retirar o máximo de proveito destes sistemas. Assim, este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade técnica, económica e ambiental da utilização de energia solar e eólica em sistemas de pequenas dimensões de produção de energia.

Neste trabalho ficou comprovado que as energias renováveis podem ser benéficas, tanto financeira como ambientalmente. No entanto, estes benefícios estão muito dependentes do local e das condições disponíveis no mesmo. Isto é, um sistema não apresentará os mesmos resultados em dois locais diferentes, pois estes não apresentam os mesmos recursos disponíveis. Assim, e para um sistema com energias renováveis na sua constituição obter resultados financeiros positivos é necessário que os recursos nesse local sejam suficientemente fortes para suprir a carga a que estiverem sujeitos e, assim, diminuir o número de horas de trabalho do gerador/rede elétrica.

Analisando agora os resultados obtidos em cada um dos locais, foi possível observar que para o caso de estudo 1, aquele que apresentava o melhor recurso eólico dos três locais em estudo, o sistema ideal era composto por 1,80 kW de painéis solares, 2 turbinas eólicas, 20 baterias, gerador a diesel e rede elétrica. Este sistema, apresentou uma redução de gastos de cerca de 25% e uma redução na quantidade de dióxido de carbono libertada de, aproximadamente, 47%. Para o caso de estudo 2, o sistema que apresentou os melhores resultados, dado os recursos disponíveis não serem os melhores (o recurso eólico disponível é bastante baixo), foi o sistema composto pelo gerador a diesel como suporte à rede elétrica. Este sistema apresentou o custo atual líquido mais reduzido, no entanto, é também o sistema com os piores resultados em relação às emissões libertadas. Com a integração de 1,80 kW de painéis solares, o sistema tem um aumento no seu custo atual líquido de 1% e uma redução também de 1% na quantidade de gases libertados. Por último, no caso de estudo 3, tanto o sistema do grupo 1 como do grupo 3, apresentam bons resultados financeiros e ambientais. O sistema otimizado do grupo 3, quando comparado com o do grupo referência, apresenta uma redução de cerca de 4% de NPC e de cerca de 30% na quantidade de CO₂ libertado.

Uma das ilações que se retirou, foi a de que devido à diferença significativa entre a potência instalada de painéis solares e a potência instalada de turbinas eólicas, o sistema ficava muito dependente do recurso eólico disponível. Como consequência deste fator, um local onde o recurso eólico seja de reduzida capacidade, como no caso de estudo 2, leva a que um sistema que utilize energias renováveis não seja viável financeiramente, por comparação com o sistema fóssil.

Outra conclusão que se pode retirar deste trabalho é que locais que apresentem tarifa elétrica e preço de Diesel baixos, comparativamente com outros locais do globo, tornam os sistemas que não utilizem energias renováveis, como é o caso do grupo referência neste trabalho, vantajosos financeiramente, por comparação com os sistemas que utilizam energias renováveis. Isto deve-se, maioritariamente, aos elevados custos de aquisição associados às energias renováveis. Estes custos de aquisição elevados aumentam bastante o capital inicial necessário para montar o sistema, levando a que este demore bastante tempo até se tornar rentável.

Em modo de conclusão, ficou provado neste trabalho que as energias renováveis são uma opção viável tecnicamente para substituir ou apoiar sistemas fósseis de produção de energia. No entanto, estão dependentes de diversos fatores que afetam bastante o seu desempenho. Assim, e caso seja feita uma cuidada seleção e otimização do sistema, tendo em conta as características do local em estudo, as energias renováveis apresentam-se como uma solução viável economicamente no apoio a sistemas de produção de energia de pequenas dimensões, para além de que ajudam a reduzir significativamente os problemas ambientais relacionados com as energias fósseis.

Bibliografia

- [1] Geradores a Diesel & Centrais de Energia - GRUPEL S.A.;. Available from: <http://grupel.eu/>.
- [2] Dudley B. BP Energy Outlook 2017 edition BP Energy Outlook 2017 edition; 2017.
- [3] Kristin Seyboth, Sverrisson F, Appavou F, Brown A, Epp B, Leidreiter A, et al. Renewables 2016 Global Status Report;.
- [4] Scamman D, Newborough M, Bustamante H. Hybrid hydrogen-battery systems for renewable off-grid telecom power. International Journal of Hydrogen Energy;(40):13876–13887.
- [5] Khan MJ, Iqbal MT. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. Renewable Energy. 2005;30(6):835–854.
- [6] Hossain M, Mekhilef S, Olatomiwa L. Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia. Sustainable Cities and Society;p. 358–366.
- [7] Bortolini M, Gamberi M, Graziani A, Pilati F. Economic and environmental bi-objective design of an off-grid photovoltaic-battery-diesel generator hybrid energy system. Energy Conversion and Management;p. 1024–1038.
- [8] Hafez O, Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. Renewable Energy. sep;p. 7–15.
- [9] Maatallah T, Ghodhbane N, Ben Nasrallah S. Assessment viability for hybrid energy system (PV/wind/diesel) with storage in the northernmost city in Africa, Bizerte, Tunisia. Renewable and Sustainable Energy Reviews. jun;p. 1639–1652.
- [10] Shezan SA, Julai S, Kibria MA, Ullah KR, Saidur R, Chong WT, et al. Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas. Journal of Cleaner Production. jul;p. 121–132.
- [11] Thiam DR. Renewable decentralized in developing countries: Appraisal from microgrids project in Senegal. Renewable Energy. aug;(8):1615–1623.
- [12] Margaret Amutha W, Rajini V. Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. Renewable and Sustainable Energy Reviews;p. 553–561.

-
- [13] Paudel S. Optimization of Hybrid Pv / Wind Power System for Remote Telecom Station Subodh Paudel Optimization of Hybrid Pv / Wind Power System for Remote Telecom Station; 2011.
 - [14] Olatomiwa L, Mekhilef S, Huda ASN, Sanusi K. Techno-economic analysis of hybrid PV-diesel-battery and PV-wind-diesel-battery power systems for mobile BTS: the way forward for rural development. *Energy Science & Engineering*; (4):271–285.
 - [15] Sinha S, Chandel SS. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; p. 192–205.
 - [16] Neves D. Optimization of hybrid renewable energy systems on isolated microgrids: a smart grid approach; 2015.
 - [17] Pansera M. Renewable energy for rural areas of Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(9):6694–6704.
 - [18] Assessment R, Analysis G. Sustainable Energy For All - Rapid Assessment Gap Analysis - Angola;.
 - [19] Newcombe A, Ackom EK. Sustainable solar home systems model: Applying lessons from Bangladesh to Myanmar’s rural poor. 2017;38:21–33.
 - [20] Mathew S, Pandey KP, Kumar V A. Analysis of wind regimes for energy estimation. *Renewable Energy*. 2002;25(3):381–399.
 - [21] Travel Weather Averages (Weatherbase);. Available from: <http://www.weatherbase.com/>.
 - [22] Diesel prices around the world, 20-Mar-2017 | GlobalPetrolPrices.com;. Available from: [http://www.globalpetrolprices.com/diesel\[_\]prices/](http://www.globalpetrolprices.com/diesel[_]prices/).
 - [23] Doing Business - Measuring Business Regulations - World Bank Group;. Available from: <http://www.doingbusiness.org/>.
 - [24] Últimas informações sobre o tempo, previsão do tempo para 14 dias, arquivo do tempo;. Available from: <https://pt.worldweatheronline.com/>.

Apêndice A

Anexo

A.1 Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 1

Tabela A.1: Resultados do estudo de sensibilidade para Santa Cruz de La Sierra

	Custo atual líquido (€)		
Valor da taxa de juro	3%	6%	12%
Grupo 1	169383	137499	99397
Grupo 2	233925	182692	122354
Grupo 3	170117	137694	99840
Grupo 4 (referência)	234588	182832	121880

A.2 Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 2

Tabela A.2: Resultados do estudo de sensibilidade para Luanda

	Custo atual líquido (€)		
Valor da taxa de juro	3%	6%	12%
Grupo 1	208590	165231	114137
Grupo 2	205711	160940	108189
Grupo 3	207229	163811	112647
Grupo 4 (referência)	204348	159518	106698

A.3 Resultados do estudo de sensibilidade financeira do caso de estudo 3

Tabela A.3: Resultados do estudo de sensibilidade para Pyay

	Custo atual líquido (€)		
Valor da taxa de juro	3%	6%	12%
Grupo 1	162089	131839	96046
Grupo 2	175340	137525	92941
Grupo 3	161579	131073	94991
Grupo 4 (referência)	174709	136668	91817